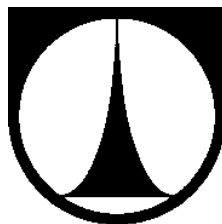


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta strojní**



**Disertační práce**

**Výzkum nekonvenčních způsobů chlazení  
tenkostěnných polypropylenových výstřiků**

**2014**

**Ing. Luboš Běhálek**

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

## Disertační práce

k získání akademického titulu Doktor (Ph.D.)

ve studijním oboru

Strojírenská technologie

### **Výzkum nekonvenčních způsobů chlazení tenkostěnných polypropylenových výstřiků**

Research of the Non-conventional Cooling Systems  
for Thin-walled Polypropylene Injection Parts

Dissertation Thesis

**Ing. Luboš Běhálek**

Školitel:	prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
Vedoucí katedry:	prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
Studijní program:	P2303 Strojírenská technologie
Studijní obor:	2303V002 Strojírenská technologie
Studijní zaměření:	Zpracování plastů

#### Rozsah práce a příloh:

Počet stran	160
Počet obrázků	95
Počet tabulek	15
Počet příloh	8

## Anotace

Disertační práce se zabývá výzkumem nekonvenčních způsobů chlazení tenkostěnných polypropylenových výstřiků, resp. temperace tvarových částí vstřikovacích forem ve vztahu k technologickému procesu vstřikování, struktuře a mechanickým vlastnostem výstřiků. Proces vstřikování je hodnocen na základě sledování teplotních polí v oblasti tvarových vložek vybrané vstřikovací formy a rozbořem působení tepelných i teplotních dějů ve fázi chlazení taveniny na morfologii a mechanické vlastnosti výstřiků.

Experimentálnímu výzkumu, využitého k formulaci závěrů, předchází rešerše teoretických poznatků spojených s tepelnými a teplotními poměry v procesu vstřikování termoplastů, temperací vstřikovacích forem a jejich působením na nadmolekulární strukturu polymerů, resp. jejich morfologii ovlivňující konečné vlastnosti výrobku.

Pro vlastní experimentální měření bylo použito vstřikovací formy, umožňující aplikaci nekonvenčních způsobů temperace tvarových vložek stlačeným vzduchem (*pomocí Rannque-Hilsch vírové trubice*), cirkulující vodou v systému konformního způsobu chlazení, tepelnou trubicí nebo aplikaci vysoce tepelně vodivých slitin na bázi mědi. Navržená koncepce způsobů temperace tvarových vložek vstřikovací formy umožňuje posoudit vliv temperačního prostředí, geometrického faktoru temperačních kanálů, tepelné vodivosti teplotnosného média a materiálu tvarové vložky na průběh teplotních polí v nástroji a jejich změnu, včetně zhodnocení výsledné krystalické struktury výstřiků i jejich mechanických vlastností.

## Klíčová slova

Teplotní pole, vírová trubice, tepelná trubice, slitiny mědi, konformní chlazení, morfologie polymeru, polypropylen.

## Annotation

Dissertation deals with the research of non-conventional cooling systems of thin-walled polypropylene injection parts or more precisely with the cooling shaped parts of injection mould with regard to injection technological process, structure and mechanical properties of injection parts. Injection moulding process is evaluated in terms of monitoring temperature fields in the area of chosen injection mould shaped inserts and analysis of temperature and thermal processes effect at the cooling phase of melt on the morphology and mechanical properties of injection parts.

Preliminary to experimental research that is used to make conclusions, there is a search of theoretical knowledge connected with the thermal and temperature processes at injection moulding process of thermoplastics, injection moulds cooling and their effects on the supermolecular structure of polymers or more precisely their morphology influencing injection part final properties.

For the experimental measurement itself was used injection mould which enables to apply non-conventional cooling systems for shaped inserts by compressed air (*by means of Ranque-Hilsch vortex tube*), circulation water in conformal cooling systems, heat tube or by application of highly heat-conductivity alloys based on copper. Proposed conception of systems for cooling injection mould shaped inserts thus by this manner enables to evaluate influence of cooling agent, geometrical factor of cooling channels, thermal conductivity of heat-transfer medium and material of shaped insert on the course of temperature fields in tool and their changes including evaluation the final morphology of injection parts and also their mechanical properties.

## Key Words

Temperature Field, Vortex Tube, Heat Pipe, Copper Alloys, Conformal Cooling, Morphology of Polymer, Polypropylene.

## Prohlášení o původnosti disertační práce

*Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.*

*V Liberci, 14. 1. 2014*

.....  
*Luboš Běhálek*

## Prohlášení k využívání výsledků disertační práce

*Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).*

*Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé disertační práce a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé disertační práce (prodej, zapůjčení apod.).*

*Jsem si vědom toho, že užít své disertační práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).*

*V Liberci, 14. 1. 2014*

.....  
*Luboš Běhálek*

## Poděkování

*Rád bych na tomto místě poděkoval školiteli panu prof. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi za odbornou pomoc, jeho podporu, trpělivost a vytvořené podmínky pro vypracování disertační práce. Děkuji také všem kolegům z Katedry strojírenské technologie, kteří mi byli nápomocni při řešení této práce, zejména panu Ing. Jiřímu Bobkovi, Ph.D. a panu Ing. Tomáši Poupovi, kteří se spolupodíleli na dílčích experimentech v rámci řešení jejich diplomových prací. Dále děkuji paní prof. Ing. Ivě Nové, CSc. za věcné připomínky a rady, které mi byly výraznou pomocí, paní Ing. Michaele Kolnerové, Ph.D. a paní Ing. Ivě Novákové, Ph.D. za jejich slovy jen těžko popsateľnou morální podporu.*

*Zvláštní poděkování patří pracovníkům firmy THHT Praha, s.r.o., Ampco Praha, s.r.o. a Innomia, a.s. Jaroměř za zhotovení tepelné trubice, dodání polotovaru slitiny mědi Ampcoloy 940 a zhotovení vložky s konformním chlazením, dále panu doc. RNDr. Františku Lednickému, CSc. za jeho odborné rady poskytnuté při společných konzultacích na Ústavu makromolekulární chemie Akademie věd České republiky, v.v.i. a možnost využít přístrojové vybavení ústavu, paní Ing. Miroslavě Maršákové, Ph.D. z Katedry materiálového inženýrství Fakulty textilní Technické univerzity v Liberci, která mi umožnila přístup do laboratoře termických analýz a poskytla potřebný časový prostor pro experimentální analýzy materiálu, panu Ing. Miroslavu Pastorkovi z Ústavu polymerního inženýrství Fakulty technologické Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, s jehož pomocí bylo možné pro analýzu obsahu krystalického podílu ve struktuře materiálu použít rentgenové difrakce záření X a Ing. Janě Müllerové, Ph.D. z Ústavu pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace Technické univerzity v Liberci za přístup k zařízení pro spektrální analýzu materiálu.*

*V neposlední řadě děkuji studentům panu Bc. Janu Průškovi a panu Bc. Jakubovi Típkovi za tvorbu 3D modelů.*

*Na závěr je také mojí milou povinností poděkovat mým rodičům paní Věře Běhákové a panu Luboši Běhálovi za jejich trpělivost a podporu, kterou mi vyjadřují.*

*Luboš Běhálek*



## Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
<b>1 ÚVOD</b>	15
1.1 Současné poznatky výzkumu tepelných procesů ve vstřikovací formě	16
1.2 Cíle disertační práce	20
1.3 Publikace k dané problematice	22
<b>2 TEPELNÉ A TEPLOTNÍ POMĚRY PŘI VSTŘIKOVÁNÍ</b>	23
2.1 Fáze plastikace	23
2.2 Fáze vstřikování a chlazení	25
2.2.1 Nehomogenní, nestacionární, transientní teplotní pole výstřiku	29
2.2.2 Temperace vstřikovacích forem	34
2.2.2.1 Temperace cirkulujícím teplotnosným (kapalným) médiem	34
2.2.2.2 Temperace tepelnou trubicí	37
2.2.2.3 Temperace vzduchem pomocí Ranque-Hilsch vírové trubice	41
2.2.2.4 Aplikace vysoce tepelně vodivých materiálů	42
<b>3 PŮSOBNÍ TEPELNÝCH PROCESŮ NA MORFOLOGII VÝSTŘIKŮ</b>	45
3.1 Krystalizace polymerů	45
3.1.1 Kinetika krystalizace polymerů z taveniny	46
3.1.1.1 Mechanismus a rychlost nukleace	47
3.1.1.2 Růst krystalitů	49
3.1.1.3 Celková rychlost krystalizace	51
3.1.2 Heterogenní krystalická morfologie reálných výstřiků	53
3.2 Vliv morfologie polymerů na výsledné vlastnosti výstřiků	57
3.3 Metody studia morfologie polymerů	59
3.3.1 Rentgenová difrakce	59
3.3.2 Polarizační mikroskopie	64
3.3.3 Diferenční snímací kalorimetrie	66
<b>4 POPIS EXPERIMENTÁLNÍHO VÝZKUMU DISERTAČNÍ PRÁCE</b>	70
4.1 Podmínky realizace experimentů	70
4.1.1 Konstrukce vstřikovací formy	71
4.1.2 Koncepce temperačních systémů v oblasti monitorované tvarové vložky	73
4.1.2.1 Aplikace Ranque-Hilsch vírové trubice	73
4.1.2.2 Aplikace tepelné trubice	76



4.1.2.3 Aplikace konformního chlazení	79
4.1.3 Materiály tvarových vložek tvárníku vstřikovací formy	81
4.1.4 Realizace experimentů a procesní parametry vstřikování	82
4.2 Použitý polypropylen	84
<b>5 EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA TEPLOTNÍCH POLÍ</b>	88
5.1 Teplotní pole formy při aplikaci Ranque-Hilsch vírové trubice	91
5.2 Teplotní pole formy při aplikaci vysoce tepelně vodivých materiálů	94
5.3 Teplotní pole formy při aplikaci konformního způsobu chlazení	97
5.4 Teplotní pole formy při aplikaci tepelné trubice	99
<b>6 SLEDOVÁNÍ MORFOLOGIE VÝSTŘIKŮ</b>	103
6.1 Analýza obsahu krystalického podílu ve struktuře výstřiků	103
6.1.1 Aplikace metody diferenční snímací kalorimetrie (DSC)	103
6.1.2 Aplikace metody širokoúhlé difrakce záření X (WAXS)	108
6.2 Mikroskopické studium struktury výstřiků	111
<b>7 SLEDOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ VÝSTŘIKŮ</b>	116
7.1 Tahové vlastnosti výstřiků v závislosti na způsobu temperace formy	117
7.2 Ohybové vlastnosti výstřiků v závislosti na způsobu temperace formy	118
<b>8 DISKUSE VÝSLEDKŮ</b>	120
8.1 Vliv tepelné vodivosti materiálu tvarové vložky	120
8.2 Vliv geometrického faktoru temperačních kanálů s cirkulujícím médiem	126
8.3 Vliv temperačního prostředku – vírové a tepelné trubice	132
8.3.1 Vliv Ranque-Hilsch vírové trubice	132
8.3.2 Vliv tepelné trubice	134
8.4 Vliv temperačních systémů formy na tokové vlastnosti taveniny polymeru	142
<b>9 ZÁVĚR</b>	144
9.1 Doporučení pro další směřování výzkumu	147
9.2 Vlastní přínos práce	148
Přehled publikací k dané problematice	150
Ohlasy publikací k dané problematice	152
Literatura	154
Seznam příloh	





## Seznam použitých zkratk a symbolů:

$A_k$	plocha krystalických reflexí	[cts·° 2 $\theta$ ]
$B_i$	Biotovo číslo	[1]
$Br$	Brinkmanovo číslo	[1]
$E$	modul pružnosti v tahu	[MPa]
$E_f$	modul pružnosti v ohybu	[MPa]
$F_u$	uzavírací síla	[N]
$F_o$	Fourierovo číslo	[1]
FWHM	šířka difrakční čáry v polovině výšky	[° 2 $\theta$ ]
$H_t$	měrná entalpie taveniny	[J·kg <sup>-1</sup> ]
$H_v$	měrná entalpie výstřiku při vyjmutí z formy	[J·kg <sup>-1</sup> ]
$I_a$	intenzita amorfních reflexí	[cts]
$I_{hkl}(\phi)$	azimutální rozdělení intenzity reflexe	[cts]
$I_k$	intenzita krystalických reflexí	[cts]
$I_{k,rel}$	relativní intenzita krystalických reflexí	[%]
$I_p$	intenzita rozptylu pozadí	[cts]
$I_z$	počet zárodků v objemové jednotce za jednotku času	[m <sup>-3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
$K$	index konzistence	[Pa·s <sup>n</sup> ]
$K^*$	konstanta související s tvarem krystalitů	[1]
$KQ_{pl}$	korigované množství uvolněného tepla z taveniny plastu	[J]
$L_{ad}$	délka adiabatické části tepelné trubice	[m]
$L_{hkl}$	střední velikost krystalitů ve směru kolmém k rovinám hkl	[nm]
$L_k$	délka kondenzační části tepelné trubice	[m]
$L_{kr}$	tloušťka krystalitu	[nm]
$L_{k,v}$	délka smáčené části tepelné trubice	[m]
$L_v$	délka výparné části tepelné trubice	[m]
LP	dlouhá perioda	[nm]
MFR	hmotnostní index toku taveniny	[g·10min <sup>-1</sup> ]
$N^*$	počet krystalizace schopných jednotek v objemu	[m <sup>-3</sup> ]
$\bar{N}$	střední počet mezirovinných vzdáleností	[1]
Pr	Prandtlovo číslo	[1]
$Q$	objemová průtoková rychlost temperačního média	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
$Q$	množství tepla	[J]
$Q_c$	celkové množství tepla odvedené tepelnou trubicí	[J]



$Q_{pl}$	množství uvolněného tepla z taveniny plastu	[J]
$\dot{Q}$	tepelný tok	[W]
$\dot{Q}_{op}$	tepelný tok předaný do okolí prouděním ( <i>konvekci</i> )	[W]
$\dot{Q}_{os}$	tepelný tok předaný do okolí sáláním ( <i>radiací</i> )	[W]
$\dot{Q}_{ov}$	tepelný tok předaný do okolí vedením ( <i>kondukcí</i> )	[W]
$\dot{Q}_{pl}$	tepelný tok mezi taveninou polymeru a stěnou formy	[W]
$\dot{Q}_{tm}$	tepelný tok mezi formou a temperačním médiem	[W]
$R_m$	mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu, plastické prodloužení měřené průtahoměrem	[MPa]
$Re$	Reynoldsovo číslo	[1]
$S_{fo}$	povrch formy ve styku s okolím	[m <sup>2</sup> ]
$S_k$	teplosměnný povrch temperačního kanálu	[m <sup>2</sup> ]
$S_{tt,v}$	plocha tepelné trubice obtékaná temperačním médiem	[m <sup>2</sup> ]
$S_v$	styčná plocha formy a rámu vstřikovacího stroje	[m <sup>2</sup> ]
$T$	termodynamická teplota	[K]
$T_d$	teplota desek vstřikovacího stroje	[°C; K]
$T_f$	teplota formy	[°C; K]
$T_{ff}$	teplota průhybu při zatížení	[°C; K]
$T_{f,max}$	maximální teplota formy	[°C; K]
$T_{f,min}$	minimální teplota formy	[°C; K]
$T_{fo}$	teplota formy v okamžiku otevření	[°C; K]
$T_g$	teplota skelného přechodu	[°C; K]
$T_i$	teplota na povrchu izolační desky	[°C; K]
$T_k$	teplota na povrchu temperačního kanálu	[°C; K]
$T_m^o$	rovnovážná teplota tání	[°C; K]
$T_m$	teplota tání	[°C; K]
$T_{max}$	maximální pracovní teplota	[°C; K]
$T_{min}$	minimální pracovní teplota	[°C; K]
$T_o$	teplota okolí	[°C; K]
$T_{p,c}$	teplota píku krystalizace ( <i>stanovená metodou DSC</i> )	[°C; K]
$T_{p,m}$	teplota píku tání ( <i>stanovená metodou DSC</i> )	[°C; K]
$T_{tav}$	teplota taveniny polymeru	[°C; K]
$T_{tm}$	teplota temperačního média	[°C; K]
$T_{tr}$	teplota na trysce	[°C; K]
$T_u$	teplota na povrchu upínací desky	[°C; K]



$T_{vi} \text{ (} i=1\div 3 \text{)}$	teplota válce (zóna 1÷3)	[°C; K]
$T_{vyh}$	teplota povrchu výstřiku po vyjmutí z formy	[°C; K]
$V$	objem	[m <sup>3</sup> ]
$V_f$	objem tvarové vložky formy	[m <sup>3</sup> ]
$V_m$	molární objem monomerní jednotky	[m <sup>3</sup> ·mol <sup>-1</sup> ]
VST	teplota měknutí dle Vicata (Vicatův stupeň)	[°C; K]
$\Delta G$	změna krystalizační volné energie	[J]
$\Delta G_{het}$	změna krystalizační volné energie při heterogenní krystalizaci	[J]
$\Delta G_{hom}$	změna krystalizační volné energie při homogenní krystalizaci	[J]
$\Delta G_{\eta}$	změna aktivační volné energie transportu polymerních segmentů	[J]
$\Delta G^*$	změna energie nukleační bariéry	[J]
$\Delta G_{het}^*$	změna energie nukleační bariéry pro případ heterogenní nukleace	[J]
$\Delta G_{hom}^*$	změna energie nukleační bariéry pro případ homogenní nukleace	[J]
$\Delta G_s^*$	změna energetické bariéry sekundární krystalizace	[J]
$\Delta H_c$	změna krystalizační entalpie	[J; J·g <sup>-1</sup> ]
$\Delta H_m$	změna entalpie tání	[J; J·g <sup>-1</sup> ]
$\Delta H_{m,100}$	změna entalpie tání dokonale krystalického polymeru	[J; J·g <sup>-1</sup> ]
$\Delta T$	rozdíl teplot (ve stěně)	[°C; K]
$\Delta T^*$	rozdíl teplot mezi stěnou tavicí komory a taveninou polymeru	[°C; K]
$\Delta T_c$	střední referenční rozdíl teplot mezi formou a temper. médiem	[°C; K]
$\Delta T_{cu}$	rozdíl teplot ve stěně měděné formy	[°C; K]
$\Delta T_f$	rozdíl teplot formy během procesu vstřikování	[°C; K]
$\Delta T_{ocel}$	rozdíl teplot ve stěně ocelové formy	[°C; K]
$\Delta T_{tm}$	rozdíl teplot temperačního média na vstupu a výstupu z temperačního okruhu	[°C; K]
$\partial T/\partial t$	časová změna teploty	[K·s <sup>-1</sup> ]
grad T	teplotní gradient	[K·m <sup>-1</sup> ]
$\nabla^2 T$	Laplaceův diferenciální parametr teploty	[K·m <sup>-2</sup> ]
$\Delta S$	změna krystalizační entropie	[J·K <sup>-1</sup> ]
$\Delta S_m$	změna entropie tání	[J·K <sup>-1</sup> ]
$a$	součinitel teplotní vodivosti	[m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
$a_{cA}$	vrubová houževnatost Charpy	[kJ·m <sup>-2</sup> ]
$c^*$	rychlost proudění teplotního média v temperačních kanálech	[m·s <sup>-1</sup> ]
$c_f$	měrná tepelná kapacita materiálu formy	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$c_p$	měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]



$C_{tav}$	měrná tepelná kapacita taveniny polymeru	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$C_{tm}$	měrná tepelná kapacita temperačního média	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$C_v$	měrná tepelná kapacita při konstantním objemu	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$d_h$	hydraulicky rovnocenný průměr temperačního kanálu	$[m]$
$d_{hkl}$	mezirovinná vzdálenost	$[nm]$
$d_{tt}$	průměr tepelné trubice	$[m]$
$f_\phi$	Hermansův orientační faktor	$[1]$
$h$	Planckova konstanta ( $6,626 \cdot 10^{-34}$ )	$[J \cdot s]$
$h$	vzdálenost od povrchu formy / tloušťka stěny formy	$[m]$
$h'$	vzdálenost dutiny formy od upínacích desek stroje	$[m]$
$h_{ip}$	tloušťka izolační podložky	$[m]$
$k$	součinitel prostupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
$k$	Boltzmannova konstanta ( $1,38 \cdot 10^{-23}$ )	$[J \cdot K^{-1}]$
$m$	hmotnost výstřiku	$[kg]$
$m_v$	hmotnost výstřiku včetně vtokové soustavy	$[kg]$
$n$	index toku ( <i>míra odchylky od newtonského chování</i> )	$[1]$
$n^*$	konstanta související s nukleačním a růstovým mechanismem krystalitů	$[1]$
$n_c$	počet cyklů	$[h^{-1}]$
$o$	obvod kanálu	$[m]$
$p_d$	dotlak	$[MPa]$
$p_v$	mez vstřikovacího tlaku	$[MPa]$
$\dot{q}$	měrný tepelný tok	$[W \cdot m^{-2}]$
$q_{zdr}$	měrný tepelný výkon vnitřních zdrojů	$[W \cdot m^{-3}]$
$q'$	poloha maxima reflexí	$[nm^{-1}]$
$r$	radiální rychlost růstu plochy sférolitů	$[\mu m \cdot min^{-1}]$
$r_{kr}$	kritická velikost zárodku	$[m^{-2}]$
$t$	čas	$[s]$
$t_{0,5}$	poločas krystalizace	$[s]$
$t^c$	doba krystalizace	$[s]$
$t_c$	doba vstřikovacího cyklu	$[s]$
$t_{ch}$	doba chlazení	$[s]$
$t_d$	doba působení dotlaku	$[s]$
$t_o$	doba odformování	$[s]$
$t_s$	strojní časy	$[s]$



$t_v$	doba vstřikování ( <i>doba působení vstřikovacího tlaku</i> )	[s]
$v$	průměrná rychlost toku taveniny	[m·s <sup>-1</sup> ]
$v_v$	vstřikovací rychlost	[m·min <sup>-1</sup> ]
$z_T$	hloubka otvoru od povrchu formy	[m]
$K$	konstanta související s nukleačním a růstovým mechanismem krystalitů	[1]
$\alpha$	úhel hřbetu	[°]
$\alpha_k$	součinitel přestupu tepla mezi stěnou temperačního kanálu a temperačním médiem	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_p$	součinitel přestupu tepla z formy do okolí	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{tt}$	součinitel přestupu tepla mezi tepelnou trubicí a temper. médiem	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\beta$	úhel bříty	[°]
$\beta_o$	integrální šířka reflexe	[°]
$\chi_c$	stupeň krystalinity	[1;%]
$\varepsilon$	emisivita povrchu	[1]
$\varepsilon$	fazetový úhel	[°]
$\varepsilon_b$	poměrné prodloužení při přetržení	[%]
$\varepsilon_{tm}$	jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti	[%]
$\langle \cos^2 \phi \rangle$	střední čtverec kosinu úhlu, který svírají řetězce makromolekul nebo jejich segmenty s referenčním směrem	[°]
$\dot{\gamma}$	smyková rychlost	[s <sup>-1</sup> ]
$\eta$	dynamická viskozita taveniny polymeru	[Pa·s]
$\lambda$	vlnová délka paprsku	[nm]
$\lambda$	úhel sklonu	[°]
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\lambda_f$	součinitel tepelné vodivosti formy	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\lambda_{ip}$	součinitel tepelné vodivosti izolační podložky	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\lambda_{tm}$	součinitel tepelné vodivosti temperačního média	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\nu$	kinematická viskozita	[m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
$\theta$	difrakční úhel	[°]
$\rho$	hustota	[kg·m <sup>-3</sup> ]
$\rho_f$	hustota materiálu formy	[kg·m <sup>-3</sup> ]
$\rho_{tm}$	hustota temperačního média	[kg·m <sup>-3</sup> ]
$\sigma_e$	povrchová energie	[J·m <sup>-2</sup> ]
$\sigma_{fm}$	pevnost v ohybu	[MPa]



$\sigma_m$	mez pevnosti	[MPa]
$\sigma_y$	napětí na mezi kluzu	[MPa]
$\tau$	smykové napětí	[Pa]
$\zeta_c$	součinitel záření absolutně černého tělesa	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-4</sup> ]
DMLS	přímé laserové spékání kovových prášků	
DSC	diferenční snímací kalorimetrie	
HRC	tvrdost dle Rockwella	
HV	tvrdost dle Vickerse	
P	spolehlivost	
PE	polyethylen	
PET	polyethylenotereftalát	
PLA	kyselina polymléčná ( <i>Polylactic acid</i> )	
PP	polypropylen	
RTG	rentgenové záření	
SAXS	malouhlový rozptyl záření X	
SM	světelná mikroskopie	
Ti <sub>(i=1÷6)</sub>	pozice umístění termočlánku	
TEM	transmisní elektronová mikroskopie	
XRD	difrakce rentgenových paprsků	
WAXS	širokouhlý rozptyl záření X	
s <sub>r</sub>	výběrová směrodatná odchylka	
μ	aritmetický průměr	

## 1 ÚVOD

Technologie a její zpracovatelské procesy patří mezi základní pilíře technických věd, obklopující člověka téměř ve všech oblastech jeho života, je součástí konstrukce i výroby strojů a zařízení a řadí se mezi hnací motory pokroku a vývoje, prosperity, ekonomické nezávislosti i bohatství. Do značné míry je tato skutečnost podpořena rozvojem materiálové základny, jejíž spektrum se v druhé polovině dvacátého století neobyčejně rozšířilo. Jedná se zejména o plasty, resp. polymerní materiály obecně, které společně s kovy patří mezi nejrozšířenější konstrukční materiály, nacházející své uplatnění v širokém měřítku průmyslových odvětví a na počátku třetího tisíciletí představují dokonce nejvýznamnější segment ze všech materiálů podle objemu výroby a spotřeby [1]. Většina vědců a výrobců z oborů spojených s materiály se shoduje v tom, že plasty a technologie založené na jejich využití budou v našem životě hrát stále významnější roli a mohou pomoci řešit mnohé z klíčových problémů, které nyní před naší civilizací a jejím dalším vývojem stojí.

Dlouhodobě nejrozšířenější technologií výroby polymerních dílů pro všechna průmyslová odvětví je technologie vstřikování termoplastů, jejíž význam a uplatnění neustále vzrůstá. Z hlediska svého principu se jedná o jednoduchý, cyklický, nestacionární děj, při kterém je plast vystaven anizotermickému tváření. Ve skutečnosti však jde o proces velmi složitý, kdy na plast v podobě taveniny působí značné mechanické síly a kdy tvářený plast prochází současně složitými tepelnými ději, při nichž je tavenina ve vstřikovací formě nejprve tvářena, poté tuhne a dále chladne. Na povrchu formy i výstřiku se tak utváří teplotní pole, které působí na strukturu, kvalitu a výsledné vlastnosti výstřiku, jenž jsou v základní rovině určovány druhem polymeru a tvarem výrobku, velkou roli však hrají také technologické parametry vstřikování, konstrukce nástroje, případně i technické parametry vstřikovacího stroje.

Úlohou teplotního režimu v procesu vstřikování je postupné laminární plnění tvarové dutiny formy taveninou plastu bez vzniku přetoků, vnitřních a povrchových vad výstřiku (*při zachování požadované chemické a fyzikální struktury materiálu*), odvod tepla z taveniny plastu, tuhnutí a chladnutí výrobku, které je nejdelším časovým úsekem procesu vstřikování a během něhož dochází ke značným místním a časovým změnám stavových veličin polymeru. Pro ideální průběh teplotního režimu vstřikování by bylo zapotřebí dvou různých teplot formy. Tepelná setrvačnost formy a rychlé střídání teplotních cyklů to však neumožňují, a tak je ve skutečnosti teplota formy kompromisem vyhovujícím uvedeným požadavkům. V některých případech, při zkracování fáze chlazení (*snížením teploty*

*formy nebo pouze dobou chlazení*), dochází k nežádoucí změně vlastností a funkčnosti výrobku, která nemá nic společného se zamýšleným zvýšením hospodárnosti výroby.

Diskontinuální zpracovatelské procesy, mezi něž technologie vstřikování termoplastů patří, se vyznačují nestabilními režimy přenosu tepla a jsou velmi citlivé na změny technologických (*procesních*) parametrů a chování polymeru při jeho zpracování. Navíc během vstřikování probíhá tváření a tuhnutí současně, a proto mohou technologické podmínky výrazně ovlivnit výslednou strukturu polymeru a následně jeho fyzikální a mechanické vlastnosti, které jsou určovány nejen strukturálními předpoklady polymeru [2], ale také kinetickými podmínkami chlazení taveniny. Vzhledem k této skutečnosti patří charakter teplotního pole a teplotní poměry ve formě, tj. rychlost a průběh ochlazování výstřiků společně s tlakovými poměry mezi významné technologické parametry, ovlivňující výslednou kvalitu plastových dílců.

## 1.1 Současné poznatky výzkumu tepelných procesů ve vstřikovací formě

Z technologického hlediska mají tepelné procesy ve vstřikovací formě, společně s dalšími jejími konstrukčními prvky, dva základní úkoly: stejnoměrné plnění tvarových dutin taveninou plastu a rovnoměrný odvod tepla z taveniny, který by navíc z pohledu ekonomického měl být uskutečňován co nejrychleji, avšak nikoliv na úkor kvality výstřiků (*tzn. užitných vlastností, tepelné stability i jejich rozměrové a tvarové přesnosti*). Problematika sdílení tepla ve vstřikovací formě během procesu vstřikování termoplastů byla prezentována v řadě publikací, uvedených např. pod odkazy [3-5]. Průběh tepelných poměrů ve formě, doba chlazení, resp. doba vstřikovacího cyklu a způsob rozložení teplotních polí na povrchu formy i výstřiku je ovlivněn teplotou taveniny, teplotou formy, temperačním systémem formy, tj. volbou temperačního prostředku, způsobem jeho umístění a dimenzování, dále tloušťkou výstřiku, ale také teplotními charakteristikami materiálu formy i polymeru. Dobu chlazení výstřiku v dutině vstřikovací formy lze stanovit na základě teoretických, resp. částečně teoretických modelů, např. podle BALLMANA a SHUSMANA [6], nebo dle autorů BUSCHE, FIELDA a ROSATA [7], kteří při stanovení doby chlazení využívají jak teoretické, tak statistické metody, popřípadě dle autorů YU a SUNDERLANDA [8], kteří kombinují experimentální, analytické a statistické způsoby jejího stanovení. Další možné modely pro semikrystalické polymery byly zveřejněny např. KIRCHEM a MENGESEM [9], popř. BERLOTEM [10], který navrhl zjednodušený vztah pro tlustostěnné díly, kdy doba chlazení je přímo úměrná druhé mocnině tloušťky výstřiku. Srovnáním jednotlivých modelů se zabývají autoři LIANG a NESS [11], kteří současně na základě výpo-



četní techniky zpřesňují vztah pro výpočet doby chlazení a výsledky porovnávají s hodnotami doporučovanými v průmyslové praxi.

K měření a sledování průběhu rozložení teplotního pole uvnitř formy, na jeho povrchu nebo na povrchu výstřiku je v technické praxi používáno měřících sestav založených na principu bezdotykového (*termovizního*) nebo dotykového měření pomocí termočlánků umístovaných v různých místech formy. V případě vývojové fáze vstřikovací formy je dnes k jeho predikci využíváno metod numerického modelování, jejichž podstata záleží na diskretizaci proměnných a jichž existuje velké množství. Účelem modelování – simulace tepelných analýz je dosažení předpovědi s co možná nejvyšší přesností, zvýšení užité kvality plastových dílců a současná minimalizace výrobních nákladů, spojených s úsporou finančních prostředků při konstrukci temperačního systému formy, jejím vývoji, následné výrobě polymerních výstřiků, dokončovacích úpravách, apod. [12]. Stejně jako i v jiných inženýrských aplikacích, i v oblasti zpracování polymerních materiálů, se postupem času vyvinuly a našly uplatnění simulační programy, které se staly nedílnou součástí přípravy konstrukce vstřikovací formy a technologie výroby. Mezi výsledky numerického a experimentálního řešení teplotního pole na povrchu výstřiku a formy lze shledat neshody, které však zpravidla nepřesahují rozmezí (10 ÷ 20) %. Možné jejich příčiny byly publikovány např. LENFELDEM pod odkazem [13].

Z rešeršních poznatků v oblasti výzkumu vlivu tepelných procesů ve vstřikovací formě na kvalitu výstřiků lze shmout, že provozní teplota formy má vzhledem ke krátké době plnění dutiny formy taveninou plastu jen malý vliv na rychlost plnění, avšak značný na rychlost a průběh ochlazování taveniny, se všemi aspekty k hospodárnosti výroby, ale především ve vztahu k ***morfologii výstřiku*** a jeho ***vlastnostem*** (viz kap. 3). Z ekonomického hlediska by bylo výhodné teplotu formy snižovat na co nejnížší hodnotu (*s ohledem na zkrácení doby cyklu*), ovšem z pohledu technologického by měla být naopak co nejvyšší, neboť se tak příznivě ovlivňují vlastnosti konečného výstřiku. Vyšší teplota formy má příznivý vliv na ***tokové vlastnosti tavenin*** polymerů [14], ale také například na ***kvalitu povrchu výstřiku***, zejména jeho lesk (*u nedežénovaných dílů*) [15]. S vyšší teplotou formy se u výstřiků zvyšuje podíl krystalické fáze a dochází u nich k nárůstu ***výrobního smrštění***, na druhé straně se v důsledku omezení sekundární (*studené*) krystalizace zmenšuje ***dodatečné smrštění***, jehož hodnotu nelze předem vyjádřit (*na rozdíl od výrobního smrštění*) [15]. Obecně rovněž platí, že snížit velikost smrštění lze prodloužením doby chlazení, která ovlivňuje relaxaci napětí.

Teplota formy a průběh chlazení výstřiku ovlivňuje efekty tuhnutí i relaxace a společně s rychlostí pohybu čela toku taveniny mají za následek vznik oblastí s rozdílnou

**orientací řetězců makromolekul** přes tloušťku výstřiku (*u plněných plastů i vláknitého plniva*), způsobující anizotropii smrštění i vlastností výstřiku. U semikrystalických polymerů se mohou tyto kombinované efekty tuhnutí a relaxace navíc projevovat v rozdílné morfologii výstřiku (*viz kap. 3.1.2*). Nejvyšší stupeň orientace se v důsledku gradientu smykových rychlostí nachází v povrchové vrstvě výstřiku a klesá s rostoucí teplotou formy i dobou chlazení, přičemž rozdíly v orientaci existují mezi amorfními a semikrystalickými polymery, u nichž je vzhledem k většímu teplotnímu smrštění natlačeno více materiálu do formy během fáze dotlaku. Tyto přídatné tokové procesy zvyšují stupeň orientace, zvláště ve středu průřezu výstřiku [16].

Teplota formy i průběh chlazení ovlivňují významně také velikost **reziduálních napětí** ve výstřiku (*na rozdíl od teploty taveniny*), která jsou výsledkem spolupůsobení tokových a teplotních činitelů a mají mimo jiné původ v orientaci makromolekul, nehomogenitě teplotního pole, rozdílných podmínkách krystalizace v jednotlivých vrstvách výstřiku (*v důsledku různé rychlosti ochlazování*), ale také v teplotním gradientu napříč stěnou výrobku, který provází ochlazování výstřiku a jehož průběh závisí na rozdílu teplot taveniny a povrchu formy i tloušťce výstřiku (*čím je rozdíl teplot taveniny a formy větší a tloušťka výstřiku menší, tím je teplotní gradient větší*) [15-18]. Během vstřikovacího procesu se na vzniku reziduálního napětí mohou podílet všechny výše uvedené mechanismy, a proto je výsledný napěťový profil dán superpozicí jednotlivých mechanismů. Reziduální napětí způsobují deformaci a smrštění výstřiku. Při působení vnějších sil na výstřik mají rovněž negativní vliv na jeho mechanickou stabilitu (*vnější zatížení je superponováno k předpětíovému stavu, neboť reziduální napětí nejsou nikdy nulová*), způsobují napěťové trhliny v důsledku environmentálního zatížení a nestability, spojené s rozměrovou přesností, tuhostí a chemickou odolností výstřiku. Teplotně indukovaná reziduální napjatost může být vlivem rozdílu rychlosti chlazení od stěny formy ke středu výstřiku posunuta, navíc je-li rychlost chlazení dvou povrchů nevyvážená, může nastat asymetrické teplotně indukované reziduální napětí. Tento způsob chlazení má za následek asymetrický tlakově-tahový charakter napětí v průřezu výstřiku (*napjatost na povrchu stěny výstřiku je tlaková, ve středu tahová*) [19] a vyvolaný ohybový moment způsobí průhyb výstřiku nebo jeho zborcení [14-16, 19]. Důsledkem jsou dílce s nestejnou tloušťkou nebo špatně chlazenými oblastmi, náchylné k nevyváženému chlazení a reziduálnímu napětí. Procesně indukovaná vnitřní napětí, která se akumulují během procesu tuhnutí, jsou označována jako reziduální napětí dutinová (*smrštění a deformace výstřiku uvnitř dutiny formy jsou mechanicky omezeny stěnami formy a dochází tak k vývinu reziduálních napětí do výstřiku*) a jsou hlavní příčinou dodatečného smrštění a zborcení součástí. Po vyhození sou-

části z formy se tato začíná smršťovat a deformovat, vnitřní napětí klesá až do okamžiku dosažení rovnovážného stavu, který vede k posunutí profilu reziduálních napětí ve vyhozeném výstřiku. V případě nesymetrického profilu napětí v průřezu výstřiku dojde k deformaci jeho stěny. Vnitřní síly v daném průřezu jsou staticky ekvivalentní s působícími napětími. Není-li splněna podmínka plasticity, jsou tato napětí v pružné oblasti a po odstranění příčiny svého vzniku zcela vymizí. Dojde-li však ke vzniku pružně plastického stavu, potom po odstranění původních příčin napjatosti (*teplotního, silového nebo deformčního působení*) zůstanou v tělese jistá zbytková – reziduální napětí (*např. při vyhazování výstřiku z formy*) [19].

Nižší reziduální napětí vznikají při nižším teplotním gradientu (*vyšší teplotě stěny formy*), kdy dochází k pomalejšímu chlazení výstřiku (*přílehlé vrstvy taveniny k povrchu formy se mohou dostatečně smršťovat*), snížení orientace makromolekul, ale na druhé straně k podpoře krystalizace, která vede ke zvýšenému smrštění. Tyto efekty mohou být částečně potlačeny vhodným dotlakem a prodloužením jeho doby. Také při kratší době chlazení, kdy dochází k rychlejšímu vyrovnání teplotního profilu přes průřez výstřiku, vznikají nižší reziduální napětí a navíc u výstřiku vyjmutého z formy při vyšší teplotě mohou snadněji probíhat relaxační procesy [16]. Nezanedbatelný vliv má také tloušťka výstřiku. Tenkostěnné výstřiky chladnou rychleji a vznikají v nich vysoké teplotní gradienty a vyšší reziduální napětí, naopak tlustostěnné díly mají vhodnější podmínky pro relaxaci napětí.

Tepelné procesy ve vstřikovací formě, resp. průběh chlazení výstřiku lze ovlivnit také způsobem temperace a materiálem vstřikovací formy, resp. tvarových částí formy. V současné době se lze v oblasti vstřikování termoplastů, v závislosti na typu a konstrukci výstřiku, setkat vedle běžného temperačního systému formy (*s cirkulujícím teplotním médiem v temperačních kanálech nebo drážkách po obvodu tvarových vložek*) také s nekonvenčními způsoby, které mohou účinně podpořit vyšší odvod tepla z výstřiku, optimalizovat rovnoměrnost rozložení teplotního pole na jeho povrchu (*v závislosti na konkrétní aplikaci*) a zabezpečit reprodukovatelnost procesu s konsekvencí vyšší produktivity, hospodárnosti výroby, ale také vyšší míry homogenity vlastností výrobku. Nekonenční způsoby temperace forem, disertantem souhrnně publikované pod odkazem [20], mohou konvenční způsob temperace doplňovat nebo v některých případech zcela nahradit. Jedná se především o temperační systémy s cirkulující vodou Contura (*vyvinutý firmou Inno-va Engineering GmbH*) [21] a konformní chlazení, dále technologii ToolVac, pracující s kapalným oxidem uhličitým (*vyvinutou firmou Foboha Werkzeugbau GmbH ve spolupráci s firmou AGA Gas AB*) [22], ale také temperační systém s tepelnou trubicí, založený na fázové přeměně teplosměnného média uvnitř trubice nebo temperační systém s vírovou

trubicí, který využívá k temperaci obyčejného stlačeného vzduchu, apod. V řadě aplikací je pro intenzifikaci chlazení tvarových částí forem využíváno vysoce tepelně vodivých materiálů. V takovémto případě je však rozdíl rychlostí smrštění jádra a povrchové vrstvy polymerního výstřiku větší, čímž se zvyšuje jeho reziduální napětí *(na rozdíl od případů aplikace materiálů s nižší tepelnou vodivostí pro konstrukci tvarových částí formy)* [16]. Z teoretických předpokladů lze očekávat, že změna standardního materiálu tvarových částí formy (*oceli*) i náhrada nebo doplnění konvenčního temperačního prostředku (*teplosného média cirkulujícího uvnitř kanálů*), používaného k jejich temperaci a k odvodu tepla z taveniny polymeru, bude mít vliv na rozložení teplotního pole, morfologii a užité vlastnosti polymerních výstřiků. Této problematice byla věnována pozornost pouze ve vztahu k použitým materiálům vstřikovací formy odlišných tepelných vlastností, viz např. studie pod odkazem [16]. V průběhu řešení disertační práce byly publikovány také výsledky studií uvedených pod odkazy [23, 24] nebo [25, 26] zabývajících se slitinami na bázi mědi a materiály pro výrobu tvarových částí forem technologickými procesy „Rapid Tooling“ (*ocelí, epoxidovou pryskyřicí, hliníkem a slitinou zinku Zamak*) ve vztahu k průběhu teploty a rychlosti chlazení taveniny ve formě během procesu vstřikování polymerů (*lineárního polyethylenu, polypropylenu a polybutylentereftalátu*), jejich fyzikálním vlastnostem a morfologii výstřiků. Výsledky uvedených studií jednoznačně prokázaly vliv materiálu tvarových částí formy na mikrostrukturu polymerních výstřiků *(v důsledku odlišných podmínek chlazení)*, jež se spolupodílí na jejich výsledných vlastnostech. Z uvedených odkazů [23-26] je problematice morfologie polypropylenových výstřiků věnována pozornost pouze pod odkazem [26]. Z výsledků této studie lze dále konstatovat, že změnou tepelné vodivosti materiálu formy nebyl ovlivněn výsledný stupeň krystalinity polypropylenových výstřiků. Naopak závěry studie uvedené pod odkazem [16], zabývající se vlastnostmi výstřiků z polypropylenu, polyoxymethylenu a polyamidu, poukazují na jejich rozdílnou krystalinitu *(zejména u polyoxymethylenu a polyamidu)* v důsledku změny materiálu formy (*ocel, mosaz a pertinax*).

## 1.2 Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je výzkum vlivu vysoce tepelně vodivých materiálů používaných pro výrobu tvarových částí vstřikovacích forem, systému konformního chlazení, tepelné i vírové trubice na proces chlazení tenkostěnných polypropylenových výstřiků a jejich vlastnosti v důsledku možných změn struktury plastů na nadmolekulární úrovni. Polypropylen je neobyčejně zajímavý materiál jak z průmyslového, tak z vědeckého hlediska. Výsledkem intenzivního základního i aplikovaného výzkumu struktury, vlastností a způso-

bu zpracování polypropylenu je nejen ovládnutí polymerní chemie a fyziky, ale také technologických procesů a dalších modifikací polypropylenu, které jsou příčinou jeho neustále rostoucího zájmu [1, 27]. Získané chemické a fyzikální poznatky umožňují v širokém rozmezí ovlivňovat jak zpracovatelské, tak užité vlastnosti tohoto polymeru, který patří na přední místo polymerních materiálů používaných nejen v automobilovém průmyslu [1]. Vzhledem ke skutečnosti, že morfologie polymeru, která rozhoduje v konečné fázi o jeho důležitých vlastnostech a mimo strukturních předpokladů je ovlivňována také termodynamickými podmínkami chlazení taveniny, které jsou v procesu vstřikování neizotermní, měly by výsledky experimentů disertační práce přispět k poznatkům o vlivu konstrukce temperačního systému formy a procesních parametrů ve fázi chladnutí polypropylenových výstřiků na jejich výslednou strukturu a vlastnosti.

V rámci výzkumu nekonvenčních způsobů chlazení tenkostěnných polypropylenových výstřiků bude disertační práce v rešeršní a experimentální části zaměřena na tyto oblasti:

- popis tepelných a teplotních poměrů ve fázi plastikace, vstřikování a chlazení tavenin polymerů,
- popis možností temperace vstřikovacích forem,
- popis působení tepelných procesů ve vztahu k morfologii polymerních výstřiků, zabývající se mechanismem krystalizace, heterogenní strukturou reálných dílů, způsobem studia morfologie a v neposlední řadě jejím vlivem na mechanické vlastnosti výstřiků,
- experimentální výzkum teplotních polí vstřikovací formy během procesu vstřikování a chlazení taveniny v závislosti na:
  - fyzikálně tepelných vlastnostech teplotnosného média v důsledku aplikace cirkulující vody a vzduchu v temperačních kanálech tvarové vložky,
  - fyzikálně tepelných vlastnostech materiálu tvarových částí formy (*součiniteli tepelné vodivosti*) v důsledku aplikace vysoce tepelně vodivých slitin na bázi mědi,
  - volbě temperačního prostředku (*cirkulující vody, vzduchu a tepelné trubice*),
  - geometrickém faktoru temperačních kanálů v důsledku aplikace konformního systému chlazení (*při aplikaci konformního způsobu chlazení dochází současně zpravidla ke změně průřezu temperačních kanálů, jejich vzdálenosti od povrchu tvarové vložky, ale také velikosti teplosměnné plochy a charakteru proudění teplotnosného média*),
- sledování morfologie výstřiků stanovením obsahu jejich krystalického podílu ve struktuře a rozbořem případných rozdílů mezi texturami na povrchu a uvnitř vzorku,



- hodnocení mechanických vlastností výstřiků v závislosti na způsobu temperace vstřikovací formy a jejich morfologické struktury,
- zhodnocení chlazení tenkostěnných polypropylenových výstřiků v závislosti na fyzikálně tepelných vlastnostech teplotnosného média a materiálu tvarových částí formy, temperačním prostředku (*cirkulující vody a tepelné trubice*) a konstrukci temperačních kanálů, jejich vzdálenosti od povrchu tvarové vložky formy i velikosti teplosměnné plochy (*prostřednictvím konformního způsobu temperace tvarové vložky*).

Výsledky disertační práce budou navazovat na dlouhodobě řešenou problematiku teplotních a tepelných procesů v oblasti zpracování polymerů technologií vstřikování, řešenou nejen na katedře strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci, ale také na dalších vědeckých a univerzitních pracovištích.

### 1.3 Publikace k dané problematice

Přehled publikací disertanta k dané problematice, včetně jejich ohlasů, je souhrnně uveden na závěr disertační práce, viz str. 150.

## 2 TEPELNÉ A TEPLOTNÍ POMĚRY PŘI VSTŘIKOVÁNÍ

Tepelné a teplotní procesy při zpracování polymerů technologií vstřikování, k nimž dochází jak ve fázi plastikace materiálu v tavící a plastikační jednotce vstřikovacího stroje, tak během fáze vstřikování, dotlaku a chlazení výstřiku, ovlivňují nejen dobu pracovního cyklu a jeho hospodárnost, ale také reologické, tokové vlastnosti polymerní taveniny ve fázi zpracování, fyzikální, mechanické i povrchové vlastnosti polymerního výstřiku. Zejména přenos tepla ve fázi chlazení výstřiku rozhoduje o jeho konečných vlastnostech, které jsou odrazem morfologie polymeru, vytvářející se při jeho krystalizaci z taveniny (viz kap. 3).

### 2.1 Fáze plastikace

Během plastikace je polymer zahříván na teplotu taveniny (*teplotu vhodnou pro vlastní zpracování materiálu*). Teplo potřebné k roztavení plastu je přiváděno kondukcí z vnějšího tepelného zdroje (*elektrických odporových pásů*) vyhřívající tavící komoru, ale také disipací mechanické energie (*třením*) při smykovém namáhání polymeru mezi stěnou této komory a uvnitř otáčejícím se šnekem, neboť nárůst teploty taveniny výhradně kondukcí je vzhledem k nízké teplotní vodivosti polymerů pomalý a doba potřebná ke zvýšení teploty přibližně na teplotu povrchu stěny tavící komory je v určité vzdálenosti od povrchu přímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti a nepřímo úměrná teplotní vodivosti [16], viz diferenciální rovnice vedení tepla (2.1):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{\Delta T}{h^2} = a \cdot \frac{\Delta T}{h^2} \quad (2.1)$$

kde značí:  $\partial T / \partial t$  časovou změnu teploty [ $\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $\lambda$  součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  $\rho$  hustotu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $c_p$  měrnou tepelnou kapacitu při konstantním tlaku [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  $\Delta T$  rozdíl teplot ve stěně [ $\text{K}$ ],  $a$  součinitel teplotní vodivosti [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ] a  $h$  vzdálenost od povrchu [ $\text{m}$ ].

Množství tepla generovaného v tavenině polymeru jednotkou objemu za jednotku času lze při smykovém namáhání vyjádřit rovnicí (2.2), resp. ve spojení s Newtonským zákonem rovnicí (2.3) [28]. Je zřejmé, že velikost generovaného tepla se mění s velikostí smykového namáhání taveniny v daném místě a vzhledem k nízké teplotní vodivosti polymeru tak může lokálně způsobit vysoké gradienty teploty v tavenině. Mírou posouzení významu tepla vzniklého smykovým namáháním a tepla přivedeného z vnějších zdrojů je tzv. Brinkmanovo číslo ( $Br \approx 0,1 \div 10$ ) [29], viz rovnice (2.4), které v případě jednosměr-

ného smyku vychází z rovnic tepla generovaného v tavenině jednotkou objemu v daném čase (viz rovnice 2.2) a vedení tepla (viz rovnice 2.1):

$$\frac{\partial\left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right)}{\partial V} = \frac{\partial \dot{Q}}{\partial V} = \tau \cdot \dot{\gamma} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \dot{Q}}{\partial V} = \eta \cdot \dot{\gamma}^2 \quad (2.3)$$

$$Br = \frac{\eta \cdot v^2}{\lambda \cdot \Delta T^*} \quad (2.4)$$

kde značí:  $Q$  množství tepla v tavenině polymeru [J],  $t$  čas [s],  $V$  objem [ $m^3$ ],  $\dot{Q}$  tepelný tok [W],  $\tau$  smykové napětí [Pa],  $\dot{\gamma}$  smykovou rychlost [ $s^{-1}$ ],  $\eta$  dynamickou viskozitu taveniny polymeru [Pa·s],  $Br$  Brinkmanovo číslo [1],  $v$  průměrnou rychlost toku taveniny [ $m \cdot s^{-1}$ ],  $\lambda$  součinitel tepelné vodivosti polymeru [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ] a  $\Delta T^*$  rozdíl teplot mezi stěnou tavicí komory a taveninou polymeru [K].

Teplo přivedené z vnějšího prostředí převládá nad teplem přeměněným z mechanické energie tehdy, je-li hodnota bezrozměrného Brinkmanova čísla velmi malá ( $Br \ll 1$ ). V opačném případě ( $Br \gg 1$ ), v důsledku smykového namáhání taveniny mezi šnekem a stěnou tavicí komory, převládá teplo generované mechanickou energií.

Brinkmanovo číslo (viz rovnice 2.4) je odvozeno pro nízkomolekulární kapaliny, jejichž tokové chování lze popsat Newtonským zákonem. Taveniny polymerů, u nichž viskozita klesá s rostoucí smykovou rychlostí [30, 31], jsou však typické nenewtonské kapaliny, označované jako pseudoplastické [31], jejichž tokové chování je popisováno mocninovým zákonem [32] viz rovnice (2.5):

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2.5)$$

kde značí:  $\tau$  smykové napětí [Pa],  $K$  index konzistence [ $Pa \cdot s^n$ ],  $\dot{\gamma}$  smykovou rychlost [ $s^{-1}$ ] a  $n$  index toku, který je mírou odchylky od newtonského chování.

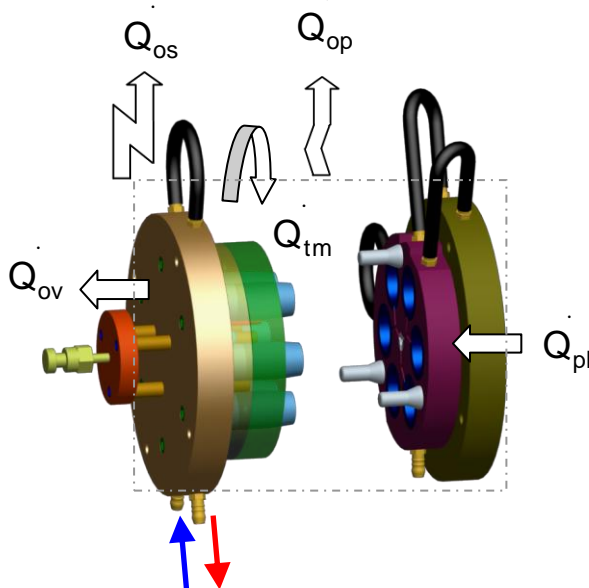
Pro taveniny plastů je tak ve skutečnosti teplo generované v tavenině jednotkou objemu v daném čase vyjádřeno rovnicí (2.6):

$$\frac{\partial \dot{Q}}{\partial V} = K \cdot \dot{\gamma}^{n+1} \quad (2.6)$$



## 2.2 Fáze vstřikování a chlazení

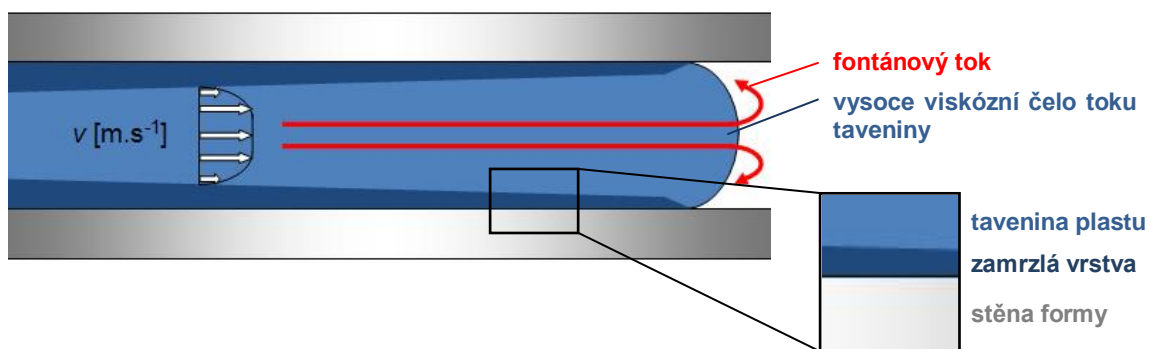
Po plastikaci polymerního materiálu dochází k tepelným tokům rovněž při plnění dutiny formy taveninou plastu a jejím následným ochlazováním (viz obr. 2.1). Tyto tepelné toky jsou způsobeny kondukcí tepla taveninou, mechanickým namáháním taveniny při viskózním toku (*především smykovými silami*), sdílením tepla mezi taveninou a stěnou



Obr. 2.1 Tepelné toky ve vstřikovací formě

formy (*kondukcí  $\dot{Q}_{pl}$* ), sdílením tepla mezi formou a temperačním médiem (*kondukcí  $\dot{Q}_{tm}$* ) a sdílením tepla mezi formou a okolím (*kondukcí  $\dot{Q}_{ov}$ , konvekcí  $\dot{Q}_{op}$  a radiací  $\dot{Q}_{os}$* ). Vstřikování je anizotermický proces tváření, proto v procesech přenosu tepla převládá výměna tepla kondukcí mezi taveninou a stěnou formy, resp. kondukce tepla složkou rovinnou stěnou a jeho přestup do temperačního média ve formě. Výsledkem je vznik ztuhlé polymerní vrstvy na stěnách dutiny formy při jejím plnění taveninou polymeru, která tepelně izoluje taveninu ve středu dutiny formy

(viz obr. 2.2). Další tok taveniny do dutiny formy probíhá mezi těmito ztuhlými vrstvami za výrazně sníženého přenosu tepla do stěn formy [16]. Jednotlivé vrstvy v pohybující se tavenině mají různou rychlost (viz obr. 2.2). Ve vrstvě dotýkající se tzv. zamrzlé vrstvy je rychlost rovna nule, směrem ke středu stěny budoucího výstřiku se rychlost zvyšuje a v ose je maximální [33]. Vytvořený rychlostní profil odpovídá parabole [18]. Průběh plnění taveniny v dutině formy je tak ovlivněn nejen použitým plastem, resp. jeho tokovými vlastnostmi, rychlostí plnění, vstřikovacím tlakem, ale také procesem chlazení a tuhnutí výstřiku, který je v technologii vstřikování řízen temperačním systémem formy a parametry temperačního média. Proces chlazení výstřiku se společně s průběhem plnění dutiny formy významně spolupodílí na morfologii výstřiku, jeho mikrostrukturních složkách i užitných vlastnostech, včetně míry jejich homogenity a anizotropie (*v důsledku orientace makromolekul*) [34]. Vzhledem k významu vlivu teplotních a tepelných procesů na morfologii polymerních výstřiků, je této oblasti věnována samostatná kapitola (viz kap. 3).



**Obr. 2.2** Průběh plnění dutiny formy taveninou plastu [33]

Teplu, které je sdíleno z výstřiku do formy, závisí na teplotě taveniny při vstřikování, teplotě výstřiku při vyjmutí z formy a měrné tepelné kapacitě polymeru. Protože měrná tepelná kapacita není u polymerní taveniny konstantní, vychází se z rozdílu entalpií mezi teplotou taveniny a střední teplotou výstřiku při vyjmutí z formy [15, 35] dle rovnice (2.7):

$$\dot{Q}_{pl} = \frac{m_v}{t_c} \cdot (H_t - H_v) \quad (2.7)$$

kde značí:  $\dot{Q}_{pl}$  tepelný tok mezi taveninou polymeru a stěnou formy [W],  $m_v$  hmotnost výstřiku včetně vtokové soustavy [kg],  $t_c$  dobu vstřikovacího cyklu [s],  $H_t$  měrnou entalpii taveniny a  $H_v$  měrnou entalpii výstřiku při vyjmutí z formy [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ], které jsou uvedeny graficky v závislosti na teplotě např. pod odkazem [36].

Přenos tepla mezi formou a temperačním médiem (viz obr. 2.3) je nutno chápat v závislosti na konstrukci vstřikovací formy jako vedení tepla složenou rovinnou stěnou a jeho přestup do temperačního média. Sdílení tepla v případě, kdy je např. pohyblivá část formy složena z několika vrstev o různé tloušťce s odlišným součinitelem tepelné vodivosti bude vyjádřeno Fourierovým zákonem (pro stanovení tepelného toku sdíleného vedením ve stěnách formy o různé tloušťce) a Newtonským zákonem (pro stanovení přestupu tepla z formy do temperačního média) [35, 37, 38]. Výsledný vztah pro tepelný tok mezi formou a temperačním médiem odpovídá rovnici (2.8):

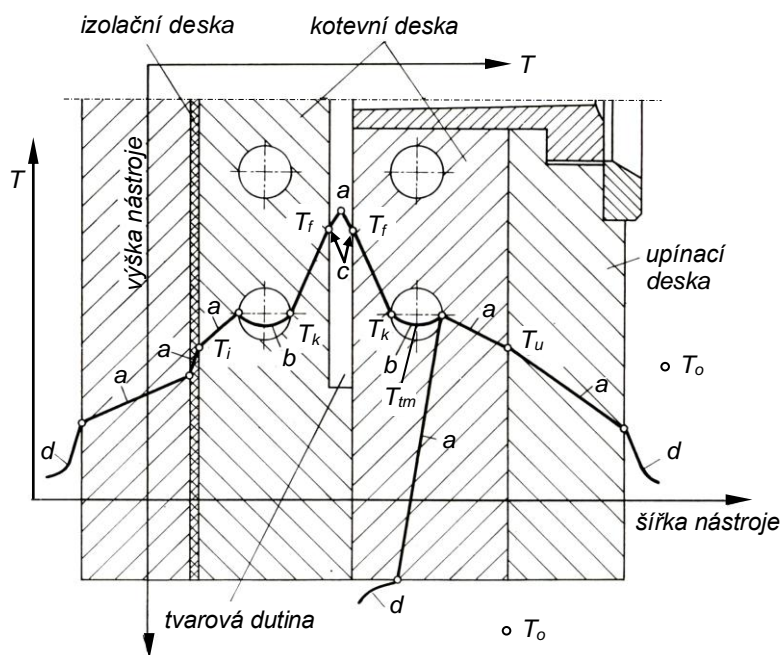
$$\dot{Q}_{tm} = k \cdot S_k \cdot (T_f - T_{tm}) \quad (2.8)$$

kde značí:  $\dot{Q}_{tm}$  tepelný tok mezi formou a temperačním médiem [W],  $k$  součinitel prostupu tepla vyjádřený rovnicí (2.9) [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  $S_k$  teplosměnný povrch temperačního kanálu, který závisí na obvodu kanálu a jeho délce [ $\text{m}^2$ ],  $T_{tm}$  střední hodnotu teploty temperačního média [K] a  $T_f$  střední teplotu stěny tvarové dutiny formy [K], která se vyjádří jako aritmetický průměr teploty formy po vyjmutí výstřiku a maximální teploty na stěně formy během

cyklu (tzv. *kontaktní teplota, která je funkcí součinitele akumulace tepla určující rychlost odvodu tepla z výstřiku do formy a teploty dutiny formy před vstřikováním i teploty taveniny, jejíž způsob stanovení je uveden např. v [38]*).

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_k} + \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\lambda_{fi}} \quad (2.9)$$

kde značí:  $\alpha_k$  součinitel přestupu tepla mezi stěnou temperačního kanálu a temperačním médiem [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  $h_i$  tloušťku dané vrstvy formy [m] a  $\lambda_{fi}$  součinitel tepelné vodivosti materiálu dané vrstvy formy [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ].



**Obr. 2.3** Schéma vstřikovací formy jako termodynamický systém [38]

a- kondukce (vedení), b- konvekce (proudění), c- kondukce a sálání, d- konvekce a sálání,  $T_f$ - kontaktní teplota na povrchu formy,  $T_k$ - kontaktní teplota na povrchu temperačního kanálu,  $T_{tm}$ - střední hodnota teploty temperačního média,  $T_i$ - kontaktní teplota na povrchu izolační desky,  $T_u$ - kontaktní teplota na povrchu upínací desky,  $T_o$ - teplota okolí

Součinitel přestupu tepla je závislý na rychlosti proudění a na součiniteli tepelné vodivosti temperačního média [35] a je dán rovnicí (2.10):

$$\alpha_k = 0,023 \cdot (Re^{0,8} - 230) \cdot (1,8 \cdot Pr^{0,3} - 0,8) \frac{\lambda_{tm}}{d_h} \quad (2.10)$$

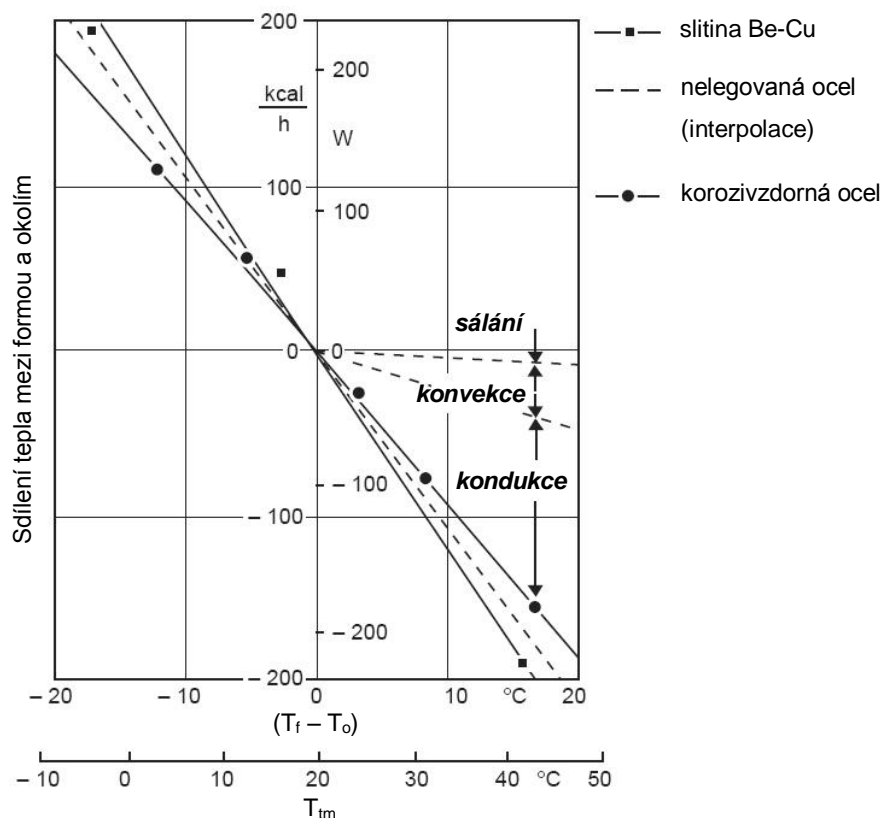
kde značí:  $Re$  Reynoldsovo číslo temperačního okruhu [1], které závisí na kinematické viskozitě temperačního média, průměru temperačního kanálu a rychlosti cirkulace temperačního média v kanálech [15],  $Pr$  Prandtlovo číslo pro temperační médium [1], které závisí na kinematické viskozitě a součiniteli teplotní vodivosti temperačního média [15],

$\lambda_{tm}$  součinitel tepelné vodivosti temperačního média [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] a  $d_h$  hydraulický rovnocenný průměr temperačního kanálu [35], který nahrazuje rozměry nekruhového temperačního kanálu jedním rozměrem [m].

Potřebná objemová průtoková rychlost temperačního média k dosažení žádaného přenosu tepla mezi povrchem tvarové dutiny formy a temperačním médiem, který ovlivňuje dobu cyklu, produktivitu a hospodárnost výroby, je dána dle [15] rovnicí (2.11):

$$Q = \frac{\dot{Q}_{tm}}{\rho_{tm} \cdot c_{tm} \cdot \Delta T_{tm}} \quad (2.11)$$

kde značí:  $Q$  objemovou průtokovou rychlost temperačního média [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $\dot{Q}_{tm}$  tepelný tok mezi formou a temperačním médiem [W],  $\rho_{tm}$  hustotu temperačního média při dané teplotě [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $c_{tm}$  měrnou tepelnou kapacitu temperačního média [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] a  $\Delta T_{tm}$  přípustnou teplotní změnu temperačního média na vstupu a výstupu z temperačního okruhu [K].



**Obr. 2.4** Sdílení tepla mezi formou a okolím v závislosti na střední teplotě temperačního média a materiálu formy [15]

Sdílení tepla mezi formou a okolím (viz obr. 2.4) je vyjádřeno tepelným tokem předaným do okolí kondukcí (viz rovnice 2.12, resp. 2.13 - pokud je mezi upínací deskou

formy a vstřikovacím strojem použita izolační podložka), konvekcí (viz rovnice 2.14) a radiací (viz rovnice 2.15, upravený Stefan-Boltzmannův zákon) [35, 39]:

$$\dot{Q}_{ov} = S_v \cdot \frac{\lambda_f}{h'} \cdot (T_f - T_d) \quad (2.12)$$

$$\dot{Q}_{ov} = S_v \cdot \frac{1}{\frac{h'}{\lambda_f} + \frac{h_{ip}}{\lambda_{ip}}} \cdot (T_f - T_d) \quad (2.13)$$

$$\dot{Q}_{op} = S_{fo} \cdot \alpha_p \cdot (T_f - T_o) \quad (2.14)$$

$$\dot{Q}_{os} = S_{fo} \cdot \varepsilon \cdot \zeta_c \cdot \left[ \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_o}{100} \right)^4 \right] \quad (2.15)$$

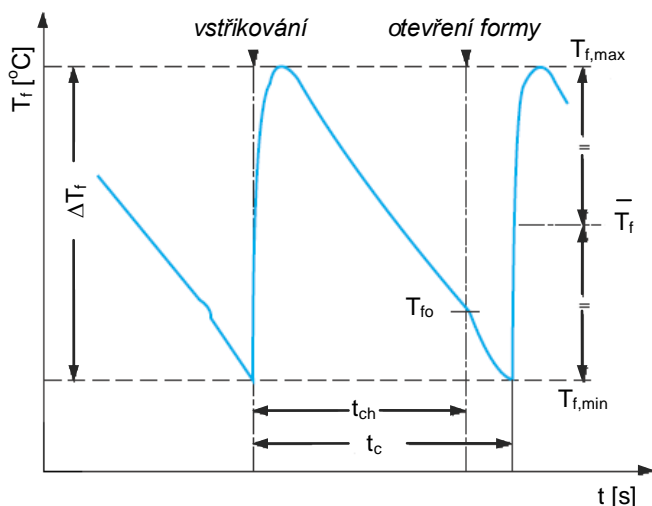
kde značí:  $\dot{Q}_{ov}$  tepelný tok předaný do okolí vedením (*kondukcí*) [W],  $S_v$  styčnou plochu formy a rámu vstřikovacího stroje [m<sup>2</sup>],  $\lambda_f$  součinitel tepelné vodivosti formy [W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>],  $h'$  vzdálenost dutiny formy od upínacích desek stroje [m],  $T_f$  střední hodnotu teploty formy [K],  $T_d$  střední hodnotu teploty desek vstřikovacího stroje [K],  $h_{ip}$  tloušťku izolační podložky [m],  $\lambda_{ip}$  součinitel tepelné vodivosti izolační podložky [W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>],  $\dot{Q}_{op}$  tepelný tok předaný do okolí prouděním (*konvekcí*) [W],  $S_{fo}$  povrch formy ve styku s okolím [m<sup>2</sup>],  $\alpha_p$  součinitel přestupu tepla z formy do okolí [W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>],  $T_o$  teplotu okolí [K],  $\dot{Q}_{os}$  tepelný tok předaný do okolí sáláním (*radiací*) [W],  $\varepsilon$  emisivitu (*zářivost*) povrchu, určující schopnost materiálu vyzařovat nebo pohlcovat záření [1], jejíž hodnoty lze pro většinu technických materiálů nalézt pod odkazem [37] a  $\zeta_c$  součinitel záření absolutně černého tělesa [W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-4</sup>].

Při sdílení tepla mezi taveninou, formou a okolím se na povrchu formy, resp. na povrchu výstřiku vytváří teplotní pole, jehož míra (ne)homogenity významně ovlivňuje kvalitu polymerního výstřiku, zejména jeho rozměrovou a tvarovou přesnost.

## 2.2.1 Nehomogenní, nestacionární, transientní teplotní pole výstřiku

Z hlediska nauky o sdílení tepla je chlazení a současný ohřev formy v procesu vstřikování dějem velmi komplikovaným a v obecné míře jde o případ nestacionárního prostorového sdílení tepla. Proces chlazení výstřiku ve vstřikovací formě je nestacionárním, cyklicky se opakujícím dějem (*je-li forma v činnosti dostatečně dlouho*), který probíhá v rozmezí teplot od teploty taveniny do teploty formy (viz obr. 2.5). Chlazení výstřiku začíná již během fáze vstřikování, pokračuje během fáze dotlaku taveniny (*kompensující smrštění plastu*) až do okamžiku otevření formy a vyhození výstřiku z tvarové dutiny. Ten-

to teplotní systém vytváří cyklické třírozměrné teplotní pole, které je nejvíce ovlivnitelné volbou, konstrukcí, způsobem umístění a účinností temperačního systému, resp. temperačního prostředku, materiálem formy a výrobku, ale také teplotní závislostí materiálu nástroje a výrobku.



**Obr. 2.5** Teplota ve stěně formy během vstřikování [40]

v každém časovém okamžiku ve všech místech vrstvy (se stejnou vzdáleností od povrchu) stejnou teplotu. Nerovnoměrné rozložení teplot v dutině formy a na povrchu výstřiku, tedy nehomogenní teplotní pole, má za následek nebezpečí vzniku rozměrových a tvarových úchylek výstřiku i nehomogenitu vlastností vlivem vysokého rozdílu teplot mezi jednotlivými oblastmi výstřiku. Těmto teplotním rozdílům se nelze vyhnout, avšak v důsledku znalosti rozložení teplotních polí je lze výrazně ovlivnit tak, aby byly v přijatelných mezích a reprodukovatelné v každém cyklu. V některých případech se však v důsledku eliminace tvarové deformace výstřiku, způsobené anizotropií smrštění plastu, temperují různé části formy odlišně.

Rozložení teploty v tělese (*teplotní pole*), resp. ve výstřiku je jednoznačně dáno jeho geometrií (*tvarem a rozměry*), vlastnostmi materiálu, rozložení teploty v určitém (*počátečním*) okamžiku a podmínkami přestupu tepla po celém povrchu tělesa během vyšetřované fáze. Třírozměrné nestacionární teplotní pole v daném časovém okamžiku je popsáno obecně rovnicí (2.16):

$$T=f(x,y,z,t) \quad (2.16)$$

Nerovnoměrné rozložení teploty v tělese má za následek vznik tepelného toku ve směru klesající teploty (*viz rovnice 2.17*):

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \text{grad}T \quad (2.17)$$

kde značí:  $\dot{q}$  měrný tepelný tok [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ],  $\lambda$  součinitel tepelné vodivosti tělesa [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] a  $\text{grad } T$  teplotní gradient [ $\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$ ], který je kritériem pro posouzení stupně rozdílnosti teplotního pole v tělese.

Vstřikovací formy jsou nejčastěji kovové a lze tedy předpokládat, že materiál formy tvoří homogenní prostředí a teplo se v něm sdílí vedením. Časovou změnu teploty v libovolném místě formy, vyvolanou přenosem tepla a působením výkonu vnitřních zdrojů energie, popisuje Fourierova diferenciální rovnice sdílení tepla (2.18) [41, 42]:

$$\rho \cdot c_v \cdot \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \lambda_x \cdot \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \lambda_y \cdot \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \lambda_z \cdot \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} + q_{zdr} \quad (2.18)$$

nebo

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \nabla^2 [T(x, y, z, t)] + \frac{q_{zdr}}{\lambda}, \quad (2.19)$$

kde

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_v} \quad (2.20)$$

kde značí:  $\rho$  hustotu [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],  $c_v$  měrnou tepelnou kapacitu při konstantním objemu [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ],  $\partial T / \partial t$  časovou změnu teploty [ $\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ ],  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  součinitel tepelné vodivosti tělesa ve směru  $(x, y, z)$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ],  $q_{zdr}$  měrný tepelný výkon vnitřních zdrojů [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ ], který je na pravé straně rovnice (2.18) přičten tehdy, dochází-li k uvolňování tepla v materiálu tělesa v důsledku chemických nebo fyzikálních změn, a součinitel teplotní vodivosti [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ] definovaný vztahem (2.20) a  $\nabla^2 T$  Laplaceův diferenciální parametr teploty [ $\text{K}\cdot\text{m}^{-2}$ ].

Řešením diferenciální rovnice (2.18) je funkce obsahující volné konstanty, které musí splňovat počáteční podmínku vyjadřující rozložení teplot v počátečním okamžiku (*neplatí u stacionárního teplotního pole*) a několik podmínek okrajových, které vyjadřují sdílení tepla na povrchu tělesa a zahrnují geometrickou a fyzikální charakteristiku formy, rozložení teplot v určitém časovém okamžiku a charakteristiku tepelného pochodu. Protože jde o diferenciální rovnici druhého řádu vzhledem k souřadnicím, bude počet okrajových podmínek  $2n$  u  $n$ -rozměrného teplotního pole. V případě třírozměrného teplotního pole se tedy bude jednat o šest okrajových podmínek, které mohou být zadány čtyřmi způsoby, tak jak je uvedeno např. v literatuře [36, 41, 42], apod. Jedná se o Dirichletovu okrajovou podmínku prvního druhu, která udává, že na povrchu tělesa je v každém časovém okamžiku známo rozdělení teplot, Neumannovu okrajovou podmínku druhého druhu, která popisuje, že daný měrný tepelný tok procházející povrchem tělesa je funkcí času,

Fourierovu okrajovou podmínku třetího druhu, která udává jako známé funkce času teplotu prostředí obklopující těleso a podmínky přestupu tepla z tělesa do prostředí a v neposlední řadě okrajovou podmínku čtvrtého druhu, která charakterizuje dokonalý styk dvou těles o různé tepelné vodivosti. Ve speciálních případech (*např. při tuhnutí odlitku*), kdy při ochlazování nebo ohřevu dochází k fázové přeměně polohy pásma fázové přeměny s časem, má uplatnění podmínka pátého druhu, která udává, že při působení tepla na povrch tělesa dochází k přeměně jeho hmotnosti a ke změně polohy povrchu s časem [42]. Tato podmínka však nemá uplatnění při řešení chlazení polymerních výstřiků, neboť vyvíjené skupenské teplo fázové přeměny není dostatečně velké a prostředí je schopno dostatečně rychle přivádět nebo odvádět teplo z pásma fázové přeměny.

Podarí-li se při řešení Fourierovy diferenciální rovnice správně formulovat okrajové podmínky, lze očekávat úspěšnost jejího řešení. Řešení tepelných úloh v systémech s rozloženými parametry lze provést analyticky, numericky nebo experimentálně. Každá z těchto metod může být deterministická nebo stochastická [43]. Řešení rovnice v trojrozměrném prostoru však představuje značné výpočetní překážky a proto tam, kde je to jen trochu možné, je převeden prostorový problém řešení sdílení tepla na problém jednorozměrný, popř. dvojrozměrný a ostatní rozměry jsou uvažovány jako nekonečně velké, v nichž je sdílení tepla zanedbáváno. Současně je řešení zjednodušeno předpokladem, že těleso (*v němž probíhá sdílení*) je homogenní-izotropní.

Pokud jde o aplikaci rovnice (2.18) na poměry v plastikářském průmyslu, především na přenos tepla mezi výstřikem a formou, jsou zde zanedbány takové činitele, jako je např. konvekce tepla v plastu, popř. vliv mezery mezi výstřikem a formou, která ovlivňuje intenzitu přestupu tepla. Velkou potíží při řešení rovnice jsou tepelné a teplotní součinitele, jež jsou funkcí teploty a času. Tyto vlivy jsou přitom obtížně začleňovány do matematického řešení dané problematiky a neúměrně tak zvyšují složitost výpočtu. Jejich účinek je spíše odhadován na základě rozdílu mezi hodnotami získanými řešením zjednodušujících rovnic a mezi hodnotami skutečně naměřenými.

Pracnost exaktního analytického řešení rovnice (2.18) způsobila, že se používá zcela výjimečně a to v jednodušším případě tvaru tělesa, okrajových podmínek a za použití vhodné idealizace úlohy [41] nebo vůbec ne a dává se přednost numerickému (*empirickému*) řešení, kterým lze řešit pouze jednotlivé konkrétní příklady. Hlavní výhodou analytického řešení je, že výsledky mají obecnou platnost. Se zřetelem na zobecnění výsledků je výhodné používat bezrozměrných parametrů jak během řešení, tak hlavně ve výsledných vzorcích. Metod analytického řešení teplotních polí existuje několik. Mezi nejdůležitější, podrobně uvedené například v literatuře pod odkazem [41], patří: řešení separací



proměnných a řešení pomocí Laplaceova zobrazení. Postupem času byla vypracována metoda fyzikální podobnosti, kdy bylo snahou charakterizovat zkoumaný jev pomocí bezrozměrných, tzv. podobnostních čísel (*jako je např. Reynoldsovo číslo  $Re$ , které charakterizuje proudění, Fourierovo číslo  $Fo$ , které charakterizuje přenos tepla vedením, Biotovo číslo  $Bi$ , představující bezrozměrný součinitel přestupu tepla, apod.*). Jedním z důležitých důvodů zavedení podobnostních čísel je, že výsledky řešení získané počtetně nebo experimentálně je možné zobecnit na případy „podobné“, tedy takové, které mají stejná podobnostní čísla (*kritéria podobnosti*). Teorie podobnosti také ukazuje, jak modelovat teplotní pole, počáteční a okrajové podmínky jinými fyzikálními veličinami, pro něž platí stejné fyzikální zákony. To se týká např. nahrazení teplotního pole polem veličin elektrických. Rozměr podobnostních čísel je dán podílem rozměrů porovnávaných hodnot. Z uvedeného plyne, že podobnostní čísla jsou čísla bezrozměrná. Podrobné rozpracování teorie podobnosti lze nalézt pod odkazem [41].

Podstatou numerických metod je diskretizace proměnných, k čemuž přispívá typická opakovatelnost jednoduchých algebraických operací určitého typu, což odpovídá operačním vlastnostem číslicových počítačů. Numerické metody umožňují získat řešení tepelné úlohy v konečném počtu diskrétních (*náhodných*) míst, resp. uzlů zvolené diferenční sítě nebo sítě konečných prvků, a to v celé oblasti, či její povrchové části. Podle toho jsou numerické metody rozdělovány na: metody konečných diferencí (*metody sítí*), metody konečných prvků a metody okrajových prvků (*metody hraničních či povrchových prvků*) [44]. Úkolem modelování (*simulace*) je dosažení předpovědi s co možná největší přesností, a tím ušetření času a finančních prostředků při vývoji, výrobě, apod. Pod pojmem simulace se rozumí matematický, popřípadě fyzikální popis reálného děje. Numerickou simulací a modelováním je možné již v předvýrobních fázích předpovídat vznik možných vad na výrobku a předcházet jim před jeho vlastní výrobou. Důležitou roli hraje navíc při optimalizaci a plánování technologických procesů. Rozhodující význam nachází u procesů se změnami teplot, resp. pro výpočty přenosu tepla během zpracování materiálu v reálném čase. V oblasti technologie vstřikování termoplastů je v České republice pro tyto účely využíváno například programů Autodesk Moldflow, Cadmould, Moldex 3D, aj.

Při řešení teplotního pole experimentálními metodami se využívá okolností, že některé fyzikální jevy jsou popsány diferenciálními rovnicemi shodnými s diferenciálními rovnicemi vedení tepla. Tak lze např. modelovat teplotní pole polem elektrickým. Teplotám pak odpovídá elektrický potenciál, tepelné vodivosti elektrická vodivost, měrnému tepelnému toku intenzita elektrického proudu, apod.

## 2.2.2 Temperace vstřikovacích forem

Teplotní pole na povrchu formy, resp. na povrchu výstřiku je vedle teplotně-materiálových vlastností formy a výstřiku ovlivněno především koncepcí a účinností temperačního systému vstřikovací formy. Koncepce temperačního systému ve formě (*typ, způsob uspořádání a dimenzování*) je určena konstrukcí vstřikovací formy, tvarovým řešením výrobku a požadavky kladenými na samotnou temperaci. Temperační systém bývá zpravidla rozdělen do více dílčích okruhů: samostatně v pevné (*vtokové*) a pohyblivé části formy dle způsobu zaformování výstřiku ve formě, jeho geometrie a polohy dělicí roviny.

Běžný a v technické praxi nejpoužívanější temperační systém je tvořen temperační a řídicí jednotkou, spojovacími prvky a vrtanými temperačními kanály ve vstřikovací formě, v nichž cirkuluje teponosné médium (*kapalina*). Existují rovněž případy, u nichž je z technologického nebo ekonomického hlediska tato koncepce temperačního systému doplněna nebo zcela nahrazena jiným temperačním prostředkem, avšak vždy se stejným cílem: zajistit rychlý a rovnoměrný odvod tepla z výstřiku. V souladu se zaměřením disertační práce jsou v následujících řešeršních kapitolách uvedeny pouze ty možnosti temperace, jež souvisí s jejím vlastním řešením. Informace týkajících se dalších možných způsobů temperace vstřikovacích forem (*např. kapalným oxidem uhličitým*) jsou publikovány autorem pod odkazem [20], popřípadě [45], který pojednává o monitorizaci a hodnocení účinnosti systému chlazení GWK. Poznatky k temperaci vstřikovacích forem kapalnými médii (*včetně systému impulsního chlazení*) lze rovněž nalézt v odborných „průvodcích“ firmy Regloplas AG St. Galen, vydávaných nakladatelstvím Hüthig GmbH Heidelberg.

### 2.2.2.1 Temperace cirkulujícím teponosným (kapalným) médiem

Cirkulující teponosná kapalná média, kterými může být voda, olej nebo glykol (*v závislosti na provozních podmínkách formy*), jsou označována za aktivní temperační prostředky, které jsou zdrojem temperace přímo ve formě [18]. Během nuceného oběhu v temperačních kanálech uvnitř formy dochází k přestupu tepla mezi formou a teponosným médiem, jehož účinnost je dána geometrií, velikostí a kvalitou styčné plochy kanálu, vzdáleností kanálů od stěn výstřiků, způsobem proudění a teplotním spádem temperačního média. S ohledem na účinnost přestupu tepla, resp. na velikost součinitele přestupu tepla mezi stěnou temperačního kanálu a temperačním médiem je proudění turbulentní ( $Re \gg 2300$ ), které je závislé na kinematické viskozitě a průtokové rychlosti média i geometrii temperačních kanálů [46]. Pro dosažení časově rovnoměrného chlazení výstřiku ve všech jeho oblastech, zabraňující nehomogenitě jeho vlastností i smršťení, které může v mezním případě způsobit jeho deformaci i vnitřní napětí, je nutné dodržovat základní

konstrukční zásady, související s umístěním a dimenzováním temperačního systému, které jsou uvedeny např. v literatuře [39, 46, 47], apod. Obecně lze uvést, že pro vyšší a rovnoměrný odvod tepla z vstříku je účelné konstruovat dostatečné množství temperačních kanálů malých průřezů co nejbližší k povrchu dutiny formy.

Soustava zařízení pro temperaci vstřikovacích forem kapalným médiem je složena z **temperační jednotky**, **řídící jednotky** s PID regulací teplotního režimu vstřikovací formy pomocí teploty teplotnosného média, teploty formy nebo vzájemné kombinace obou uvedených způsobů (*kaskádní regulace*) [40, 48] a **spojovacích prvků**. Temperační jednotka je vybavena chladícím okruhem, topením, vhodným typem cirkulačního čerpadla (*s dostatečnou dopravní kapacitou a potřebným provozním tlakem*) a řadou zabezpečovacích prvků, umožňujících bezporuchový provoz. Spojovací prvky jsou určeny k rozvodu teplotnosného média a k propojení temperačních kanálů mezi tvarovými částmi formy a temperační jednotkou.

Jak již bylo uvedeno, výběr teplotnosného média používaného k temperaci vstřikovacích forem je závislý na provozních podmínkách technologie vstřikování, především na požadované teplotě temperace vstřikovací formy, která je volena dle aplikace a typu zpracovávaného polymeru. Jednoznačně upřednostňovaným teplotnosným médiem (*do teploty temperace 90 °C, resp. 160 °C v tlakových okruzích*) je voda a to s ohledem na její tepelné vlastnosti, dosahovaný specifický topný výkon, ekologickou nezávadnost, nehořlavost, nízkou viskozitu, ekonomickou nenáročnost a prakticky neomezenou použitelnost [49]. Má-li být zaručen hospodárný, bezporuchový a dostatečně výkonný provoz temperačního zařízení s cirkulující vodou, je účelné využívat s rostoucí teplotou média (*nad 60 °C, kdy dochází ke ztrátě chemicky čisté vody v podobě vodní páry*) vhodné kondicionační prostředky, zabraňující snížení přestupu tepla tvorbou vodního kamene na stěnách temperačních kanálů (*v důsledku přítomnosti minerálních látek ve vodě, závislých na geologických podmínkách*), zvyšující korozní ochranu temperačního systému (*např. prostředky na bázi kyseliny fosforečné*), snižující množství nečistot, usazenin, apod. [49, 50]. Při vyšších teplotách temperace se používají média organické povahy na bázi minerálních a syntetických olejů, vyznačující se vysokým bodem varu při atmosférickém tlaku, velkou měrnou tepelnou kapacitou, dobrou tepelnou vodivostí, nízkou viskozitou i při nižších teplotách temperace, vysokou tepelnou stabilitou, netečností k použitému materiálu temperačního zařízení, apod. [51]. Výjimkou dnes není ani temperační jednotka s kombinovaným vodním a olejovým oběhem, ovládaná zdvojeným mikroprocesorovým systémem. Výběr temperační jednotky tak bude záviset na druhu zpracovávaného materiálu, hmotnosti formy, času potřebného k ohřevu formy na provozní teplotu (*pro stanovení tepelného výkonu*)

a množství polymeru zpracovávaného za časovou jednotku (*pro výpočet chladicího výkonu*) [40].

Průtok teplotnosného média okruhem temperačního systému může být řešen jako kontinuální nebo impulsní. **Systém impulsního chlazení** nabízí možnost úpravy režimu odvodu tepla i doby vstřikovacího cyklu [52]. Principem je v první fázi odvod co největšího množství tepla z taveniny vstříknuté do dutiny formy cirkulující vodou v temperačních kanálech a v druhé fázi dochlazení dílu způsobem, kdy v temperačních okruzích přestane voda cirkulovat nebo cirkuluje přerušovaně, čímž se ohřívá a zabraňuje tak podchlazení vstřikovací formy. Temperace formy na provozní teplotu je zajištěna teplem z taveniny polymeru a teplota formy je udržována impulsní cirkulací studené vody v temperačních kanálech.

Zvláštním případem kontinuální temperace s cirkulující vodou v temperačních kanálech je temperační systém vyvinutý firmou Innova Engineering GmbH Menden, známý pod obchodním označením **Contura**. Jedná se o účinný chladicí systém s temperačními kanály sledující obrys tvarové dutiny vstřikovací formy a usnadňující výrobu chladících kanálů s různým průřezem. Řešení spočívá v rozdělení tvárníku do dvou nebo více vrstev, na jejichž stykových rovinách lze pak snadno obrábět temperační kanály a přizpůsobit je tak obrysům výstřiku. Vrstvy se následně ukládají na sebe a v homogenní tvarovou část vstřikovací formy se spojují difusně, speciální technikou pájením natvrdo v podtlaku [53, 54]. Předností tohoto systému je rychlý a rovnoměrný odvod tepla z formy [21], avšak vzhledem k ekonomické náročnosti spojené s jeho výrobou je tento systém používán ve vstřikovacích formách výhradně v tvarových vložkách vymezujících tvarovou část formy, viz např. [55]. Vzhledem k náročnosti zhotovení temperačního systému Contura je dnes tento systém nahrazen způsobem založeným na technikách metod rychlé výroby nástrojů „Rapid Tooling“, které umožňují zhotovit temperační kanály v tvarových vložkách formy tak, aby jejich rozměry (*průměr již od 1,5 mm*) a vzdálenost od povrchu formy (*již od 1 mm*) byly co nejmenší, nedošlo k porušení pevnosti formy a ve výsledku bylo docíleno intenzivního i rovnoměrného odvodu tepla z taveniny. Tyto metody jsou založeny na metodách systému „Rapid Prototyping“, které v posledních letech zaznamenávají mohutný rozvoj. V technické praxi je k výrobě tvarových vložek pro vstřikovací formy využívána metoda „DMLS“ (*Direct Metal Laser Sintering*), jejímž principem je zhotovení tvarové vložky spékáním kovového prášku po vrstvách pomocí laseru (*na základě 3D počítačového modelu*) a vytvoření temperačních kanálů (*okruhů*), které sledují obrys tvarové vložky obdobně jako systém Contura [56]. Tento moderní způsob temperace tvarových vložek je

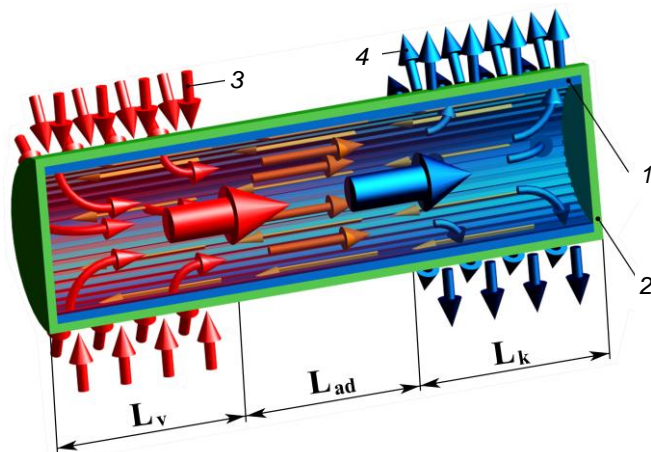
označován jako **konformní chlazení** a v České republice se jím zabývá např. firma Innomia, a.s. Jaroměř.

### 2.2.2.2 Temperace tepelnou trubicí

Tepelná trubice (*s hliníkovým, ocelovým nebo měděným pláštěm*) je zařízení, které působí jako vynikající vodič tepla. Na základě fázové přeměny teplosměnného média uvnitř trubice (*čpavku, freonu, metylalkoholu, vody, aj.*) umožňuje velmi intenzivní přenos tepla z oblasti o vyšší teplotě do oblasti o teplotě nižší a to i při malém rozdílu mezi nimi. Tepelná trubice může mít podle potřeby dané konstrukcí vstřikovací formy libovolný tvar (*válcový, kuželový, deskový, apod.*) [35]. Předností tepelných trubic jsou jejich malé průměry ( $2 \div 20$ ) mm a proto se v oblasti vstřikování polymerů používají zejména při vstřikování tenkých a často také tvarově členitých výrobků, které by jinak vyžadovaly složité temperační kanály. Podobně nachází uplatnění při temperaci dlouhých tvárnků, kdy konstrukční řešení formy neumožňuje cirkulaci vody směrem k jeho vrcholu způsobu založenými např. na principu tzv. „fontánkové“ temperace nebo ploché či spirálové přepážky [57]. Tepelné trubice doplňují vhodně také konvenční systémy s nucenou cirkulací (*konvekcí*) vody a v průmyslové praxi jsou často používány ve vzájemné vazbě pro vyšší intenzifikaci chlazení. V těchto případech je nutné v oblasti kondenzační části trubice, která ústí do temperačního kanálu s cirkulující vodou, vytvořit prostor, který umožní dostatečné proudění vody [58]. Při aplikaci tepelné trubice v oblasti tvarové části vstřikovací formy je nutné zabránit vytvoření vzduchové mezery, která by mohla zvýšením tepelného odporu mezi formou a tepelnou trubicí snížit tepelný výkon. Z tohoto důvodu se pro zajištění co nejméně ztrátového kontaktu mezi formou a tepelnou trubicí používá tzv. tepelný spoj, což je vysoce tepelně vodivý materiál gelové povahy. Rozdíl mezi průměrem kanálu pro tepelnou trubicí a jejím nominálním průměrem by se měl pohybovat v rozmezí ( $0,1 \div 0,4$ ) mm [58].

Princip činnosti vírové trubice je patrný z obr. 2.6. Jedná se o oběhový systém s výparnou, adiabatickou a kondenzační částí. Trubice je po mechanicko-chemickém ošetření vnitřního povrchu vakuově uzavřena na obou koncích zátkami a po vyčerpání vzduchu pomocí tenké plnicí trubičky (*do tlaku  $< 10$  Pa*) je touto naplněna teplosměnným médiem a vakuově utěsněna. Při ohřevu trubice teplem přivedeného z taveniny plastu se teplosměnné médium vypařuje a přitom odebírá značně velké množství tepla z taveniny plastu. Vzniklé páry proudí adiabatickou částí trubice do její chlazené části s nejnižší teplotou. Páry zde kondenzují a předávají latentní výparné teplo (*pro změnu skupenství, bez změny teploty*) chladicímu okolí, např. cirkulující vodě v temperačním kanálu (*v přípa-*

dě vzájemné kombinace tepelné trubice a cirkulující vody v temperačních kanálech vstříkovací formy). Zkondenzované teplosměnné médium se z ochlazované části trubice vrací zpět do ohřívané části tíhovými, odstředivými nebo kapilárními silami [47, 60-62]. Při



**Obr. 2.6** Princip činnosti kapilární tepelné trubice [59]

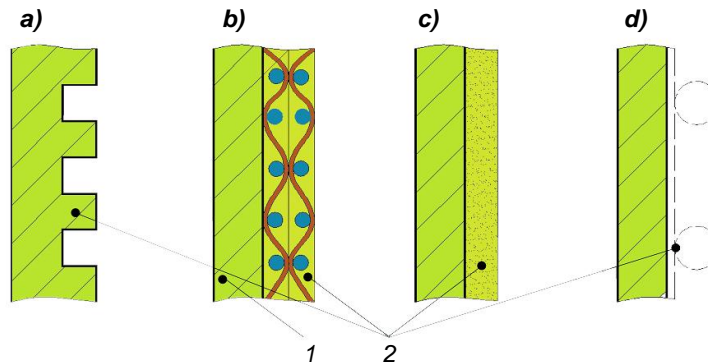
1- kapilární soustava, 2- plášť trubice, 3- přívod tepla, 4- odvod tepla,  $L_v$ - výparná část trubice,  $L_{ad}$ - adiabatická část trubice,  $L_k$ - kondenzační část trubice

správné činnosti trubice nesmí v rozsahu provozních parametrů docházet k nedostatečnému smáčení povrchu výparné části v důsledku malého množství teplosměnného média a tím k poklesu výkonu a na druhé straně ani k vývinu velkých parních bublin (při varu média) a vzniku rázových jevů v důsledku výrazného přebytku teplosměnného média ve výparné části [61].

Podle způsobu návratu kondenzátu jsou rozlišovány různě

druhy tepelných trubice. Výrobně nejjednoduššími, pracujícími ve vertikální nebo skloněné poloze (s kondenzační částí umístěnou nad částí výparnou), jsou **tepelné trubice gravitační**, u nichž se kondenzát vrací do výparné části působením tíže po hladké vnitřní stěně trubice. Převedený tepelný tok je závislý na tepelném odporu filmu kapaliny na stěně kondenzační části [61]. V případě návratu kondenzátu do výparné části odstředivými silami (rotací trubice) se jedná o **rotační tepelné trubice**, u nichž je optimální množství náplně takové, kdy tloušťka vrstvy kapaliny na stěně je co nejmenší, ale přitom souvislá a stabilní. Tepelný výkon rotační tepelné trubice je závislý mj. na poloměru otáčení a obvodové rychlosti. Kapalná fáze nesmáčí celý obvod vnitřní stěny trubice a proto je dosažený tepelný výkon menší, než v případě gravitační tepelné trubice [61]. Posledním typem tepelné trubice podle návratu kondenzátu do výparné části jsou **kapilární tepelné trubice**, které jsou z hlediska pracovní polohy univerzální a jsou schopny samočinně nastavit svůj stabilní pracovní režim. Návrat kondenzátu je zajištěn kapilárním tlakem, který vzniká na styku teplotního média s vhodnou kapilární soustavou na vnitřní stěně trubice (viz obr. 2.7), která může být velmi rozmanitá a o použití určitého typu tak zpravidla rozhodují hlediska technologická nebo technickoekonomická. Vzniklý kapilární tlak roste s klesající velikostí pórů, čímž se však zároveň zvyšuje hydraulický odpor soustavy. Z hlediska tepelného odporu by kapilární soustava měla být co nejtenčí. Při srovnání

s pouhým filmem kapaliny zmírňuje kapilární soustava nepříznivý účinek protiproudé interakce páry a kapaliny na fázovém rozhraní a strhávání částic kapaliny do proudu páry, což jinak snižuje tepelný výkon tepelné trubice. Přenos tepla může být veden axiálním, radiálním nebo obvodovým směrem. Kombinované uspořádání kapilární soustavy dovolu-  
je přenos tepla jak v axiálním, tak v radiálním směru [61].

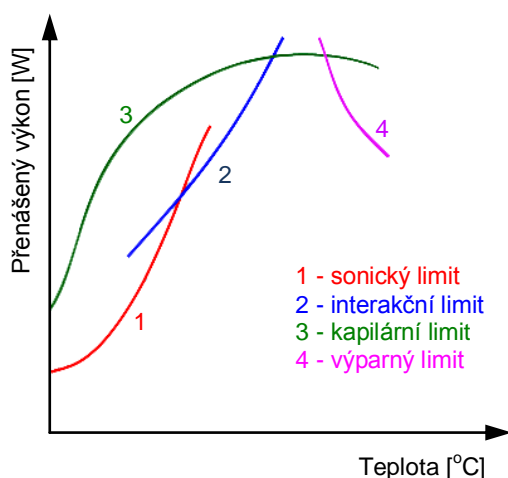


**Obr. 2.7** Základní typy kapilárních soustav [59]

a) drážková, b) vytvořená z kovových sít, c) spěkaná z prášků nebo vláken, d) arteriální  
1- stěna tepelné trubice, 2- kapilární soustavy

Tepelné trubice mohou pracovat jako výkonové nebo stabilizační. **Výkonové tepelné trubice** jsou určeny k intenzivnímu přenosu tepla při malém rozdílu teplot mezi ohřívající a ochlazovanou částí trubice, zatímco **stabilizační tepelné trubice**, které jsou plněny teplosměnným médiem a vhodným inertním plynem, plní vedle funkce přenosu tepla též funkci stabilizace teploty teplosměnného povrchu při změně tepelného toku.

S ohledem na hydrodynamické a tepelné pochody, které v trubici při různých pra-



**Obr. 2.8** Průběhy jednotlivých limitů výkonů tepelné trubice v závislosti na teplotě [59]

covních podmínkách probíhají, může tepelný výkon dosáhnout maximálně vždy jen limitní hodnoty, která závisí zejména na pracovní teplotě (viz obr. 2.8) a jedná se o tzv. sonický, interakční, kapilární nebo výparný limit. Hodnoty jednotlivých limitů, které jsou výsledkem termodynamického výpočtu, uvádí obvykle výrobce tepelných trub a liší se podle použitého materiálu pláště tepelné trubice, teplosměnného média, kapilární soustavy a pracovní teploty trubice. Tyto limity jsou nejčastěji reprezen-

továny uvedeným rozsahem pracovních teplot, v němž tepelná trubice plní svoji funkci nejefektivněji [47, 61]. Na základě porovnání látkového faktoru, charakterizující látkové vlastnosti teplosměnného média, které jsou úměrné tepelnému výkonu kapilárních trubic, vyplývá, že nejvhodnější náplní tepelných trubic je voda a rtuť, neboť alkoholy a freony mají podstatně nižší látkový faktor [60].

Při zvyšování tepelného toku do výparné části trubice během startu nebo při činnosti trubice v oblasti nízkého tlaku nasycené páry mohou nastat podmínky, kdy rychlost páry teplosměnného média na výstupu z výparné části dosáhne maximální hodnoty, tj. rychlosti zvuku v daném prostředí. Mezní hodnota tepelného výkonu trubice při sonické rychlosti je označována jako **sonický limit tepelného výkonu** a je funkcí měrného výparného tepla teplosměnného média, jeho měrné plynové konstanty, hustoty, adiabatického exponentu a teploty [61].

Se stoupajícím tepelným výkonem tepelných trubic a tím i se stoupající rychlostí páry teplosměnného média uvnitř trubice, dochází k výraznější interakci parní a kapalné fáze. Mezifázový povrch se stává nestabilním a tečné síly na povrchu kapaliny překonávají síly povrchového napětí. Na povrchu kapalné fáze se zpočátku objevují vlny, z nichž se posléze odtrhávají kapky. Při určité rychlosti páry se proudění kapaliny do výparné části přeruší a dochází k tzv. zahlcení tepelné trubice, kdy kapalná fáze je držena pouze v kondenzační části a výparná část se přehřívá v důsledku nedostatku teplosměnného média. Odpovídající mezní hodnota tepelného výkonu, při které nastává zahlcení tepelné trubice, je označována jako **interakční limit tepelného výkonu**, který je závislý na vnitřní ploše trubice, hustotě teplosměnného média, povrchovém napětí, jeho měrném výparném teple a typu kapilární soustavy [61].

Při ohřívání teplosměnného povrchu s vrstvou kapaliny na mezi sytosti lze sledovat tři známé základní režimy sdílení tepla. Při malém rozdílu teploty ohřívání povrchu a teploty mezifázového povrchu kapaliny nastává přirozená konvekce kapalinou s povrchovým vypařováním. Při zvyšování rozdílu teplot nastává bublinkový var, který pak dále přechází v blánový var. Přestože intenzita přestupu tepla při bublinkovém varu je největší, u kapilárních trubic není žádoucí, protože způsobuje narušení kapilárního sání kapaliny z kondenzační do výparné části trubice. Odpovídající mezní tepelný výkon, při kterém dochází u kapilárních trubic k bublinkovému varu a u gravitačních trubic k blánovému varu, se nazývá **výparný limit tepelného toku**, který je funkcí teploty, povrchového napětí teplosměnného média a jeho měrného výparného tepla, typu kapilární soustavy, hustoty teplosměnného média a tepelné vodivosti tepelné trubice [61].

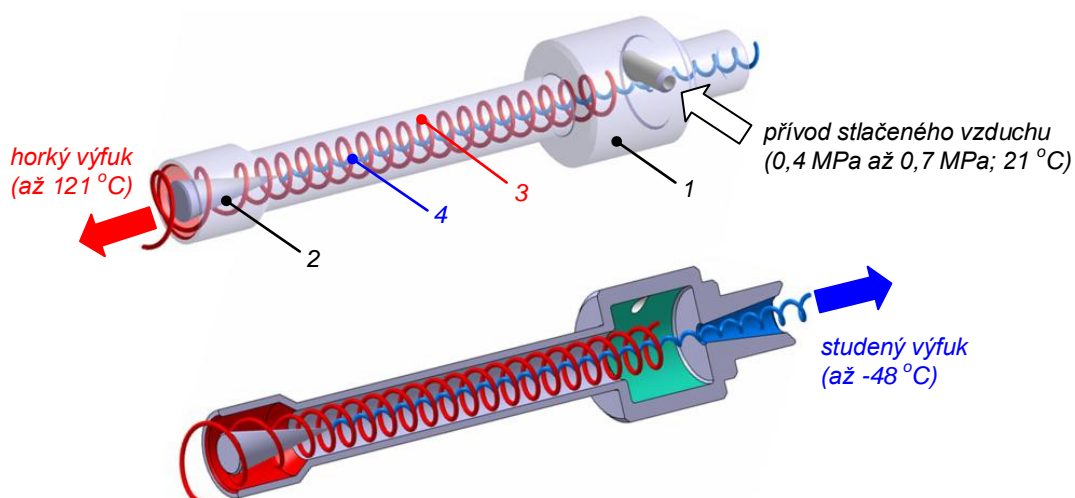


Kapilární soustava tepelné trubice, v případě, že se jedná o kapilární typ trubice, je schopna převést určité množství kondenzátu zpět do výparné části trubice, aby se zde mohl znovu účastnit procesu, který v tepelné trubici probíhá. Toto množství úzce souvisí s tepelným tokem přiváděným k výparné části trubice. Maximální tepelný tok, resp. **kapilární limit tepelného toku** je poté závislý na typu a materiálu kapilární soustavy, povrchovém napětí kondenzátu i délce kapilární soustavy a je definován tepelným tokem, při kterém hnací tlak již nestačí dopravovat kondenzát do výparné části [61].

### 2.2.2.3 Temperace vzduchem pomocí Ranque-Hilsch vírové trubice

Temperace tvarových částí formy pomocí vzduchu se vzhledem k jeho malé účinnosti používá jen ve výjimečných případech, kdy použití kapaliny nebo jiného temperačního prostředku není pro nedostatek prostoru možné. Zpravidla se však používá při volném proudění (*při odvodu tepla z povrchu formy a při chlazení tvarových částí během otevření formy*) nebo nuceném proudění působením přetlaku, popřípadě podtlaku [18].

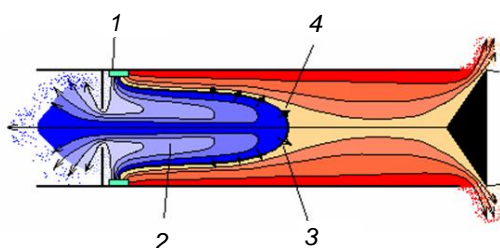
Jedním ze zařízení, které umožňuje temperaci forem pomocí obyčejného stlačeného vzduchu a současně regulaci množství proudícího vzduchu i jeho teploty je Ranque-Hilsch vírová trubice (viz obr. 2.9). Jedná se o konstrukčně jednoduché zařízení, které upravuje stlačený vzduch do dvou vzduchových proudů (*horkého a studeného*). Ačkoliv existuje mnoho teorií popisujících princip činnosti vírové trubice, není dosud tento princip dostatečně a jednoznačně definován a do jisté míry je z fyzikálního hlediska „záhadou“. Stlačený vzduch, přiváděný např. z rozvodné sítě nebo tlakové nádoby kompresoru, vstupuje jedním nebo více tangenciálně vrtanými otvory do stacionárního generátoru trubice,



**Obr. 2.9** Model protiproudé Ranque-Hilsch vírové trubice [63, 64]

1- stacionární generátor, 2- řídicí ventil, 3- vnější proudnice ohříváného vzduchu,  
4- vnitřní proudnice ochlazovaného vzduchu

kde expanduje a zvyšuje rychlost, která dosahuje až rychlosti zvuku. Generátor vyvolává téměř symetrické proudění vzduchu (viz obr. 2.10) a pod vlivem odstředivých sil nutí rotovat stlačený spirálový proud vzduchu trubici podél její vnitřní stěny směrem k řídicímu jehlovému ventilu, který umožňuje redukovat relativní množství proudícího vzduchu vystupujícího z trubice přes jehlový ventil jako horký výfuk. Vzduch je od místa vstupu do



**Obr. 2.10** Schéma proudového pole v protiproudé vírové trubici [63]

- 1- přívod stlačeného vzduchu
- 2- cirkulující proud
- 3- hraniční proudnice
- 4- místo přenosu energie

generátoru k místu horkého výstupu ohříván disipací mechanické energie (*třením*), zvláště pak blízko stěny vírové trubice, kde gradient rychlosti vzduchu je největší. Studený proud vzduchu, separovaný z teplého proudu směřuje do centra (*k ose*) vírové trubice a je tlačěn zpět středem vírové trubice podél spirálových proudnic teplého proudu vzduchu. Tento rotující vzduch se pohybuje menší rychlostí a koná přirozenou výměnu tepla. Vnitřní proud vzduchu předává teplo vnějšímu, rychleji se pohybujícímu proudu vzduchu [64, 65].

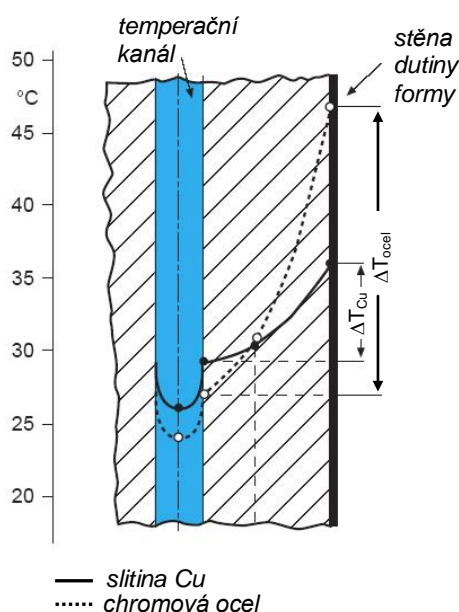
O možné separaci teplot pojednávají např. studie FRÖHLINGSDORFA [66] a KUROSÁKY [67], ale i v těchto vědeckých pojednáních se lze setkat s drobnými nuancemi, jak dochází ke změně teploty vůči vstupnímu vzduchu a jak vzniká teplotní difference mezi proudy uvnitř vírové trubice. Pomalejší vnitřní sloupec vzduchu procházející středem stacionárního generátoru dosahuje na výstupu nízkých hodnot. Teplota a množství vzduchu na výstupu v oblasti horkého a studeného výfuku je řízena řídicím ventilem. Hodnoty teploty výstupních proudů jsou také závislé na tlaku přiváděného stlačeného vzduchu na vstupu do vírové trubice i na jeho vlhkosti, přičemž se snižujícím se tlakem se snižuje také rozdíl teplot na obou výstupech [64].

#### 2.2.2.4 Aplikace vysoce tepelně vodivých materiálů

Vysoce tepelně vodivé materiály nejsou v pravém smyslu slova skutečným temperačním prostředkem, přesto se v konstrukci vstřikovací formy využívají záměrně k ovlivnění odvodu tepla z tvarových míst výstřiku, které se obtížně temperují (*např. tenké výstřiky, žebra a dlouhé tvárníky*), do míst, kde lze již odvod tepla zajistit obvyklým způsobem a zabraňují tak nerovnoměrnému teplotnímu zatížení nástroje i výstřiku se všemi jeho následky. Jako vysoce tepelně vodivého materiálu v konstrukci vstřikovacích forem, které ve většině případů doplňují temperační systém s nucenou konvekcí vody v temperačních

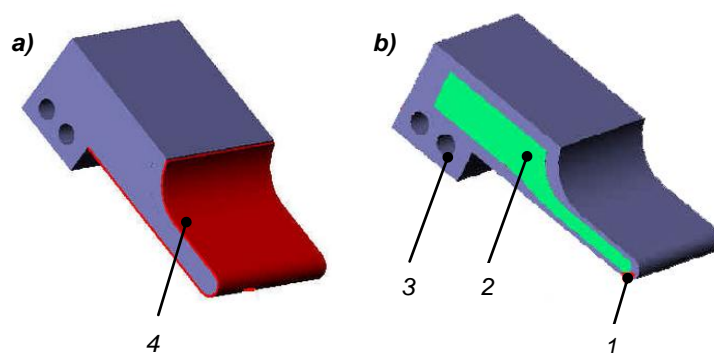
kanálech, se používá měď a její slitiny na bázi Be, Co, Sn, ad. (*čistá měď se používá jen zcela výjimečně*).

Z vysoce tepelně vodivých materiálů jsou vyráběny chladicí trny tenkých tvárníků, ale i tvarové vložky, pokud to požadavky kladené na vlastnosti tvarových částí formy dovo-  
lí (*pevnost, tvrdost, lesk, korozní odolnost, otěruvzdornost, rozměrová stabilita, apod.*) nebo jiné konstrukční prvky vstřikovací formy (*např. vyhazovací kolíky, vodící a středící pouzdra, apod.*). Hlavní předností používaných slitin mědi (*např. Ampco, Ampcoloy, Mouldmax, ad.*), vedle dobré chemické odolnosti, kluzných vlastností (*usnadňující odformování výstřiku*) a dobré leštitelnosti (*zajišťující kvalitu povrchu vstřikovaného dílce*) je jejich velmi dobrá tepelná vodivost (*až čtyřikrát vyšší, než u nástrojové oceli*) [16], umožňující dosáhnout rychlý odvod tepla z formy vedením (*viz obr. 2.11*). Výsledkem může být zkrácení pracovního cyklu (*až o několik desítek procent*) [69, 70], zvýšení rozměrové a tvarové přesnosti výstřiku [70, 71], tepelné i rozměrové stability formy a snížení nebezpečí její deformace [39]. Slitiny mědi lze snadno obrábět třískovými metodami, hůře však metodami elektroerozivními. Výsledné vlastnosti použité slitiny závisí na jejích chemickém složení a při volbě vhodné slitiny bude vždy záviset na tom, která kritéria se upřednostní [16].



**Obr. 2.11** Teplotní profil v příčném řezu nástroje během chlazení se znázorněním teplotního rozdílu pro oblast vedení tepla v závislosti na materiálu formy [68]

Nevýhodou používaných slitin je především jejich nízká tvrdost (*zejména při vstřikování termoplastů se skelnými vlákny*), což však řeší nově patentovaná technologie **Mecobond** (z anglického *Mould Equipment Composite Bond*), kterou se vyrábí především vysoce tepelně namáhané konstrukční prvky formy, zejména tvarová jádra, u nichž je požadována vysoká tepelná vodivost v celém objemu materiálu a zároveň odpovídající mechanické vlastnosti (*pevnost a tvrdost*). Technologií Mecobond (*evropský patent EP 1 878 556 A1*) jsou zhotovována tvarová jádra (*s tepelnou vodivostí až desetkrát vyšší, než u nástrojové oceli*) difusním spojením dvou materiálů (*za vysoké teploty a tlaku*): oceli a mědi, přičemž ocel tvoří vnější povrch, zajišťující mechanickou stabilitu tvarového jádra včetně jeho ochrany proti opotřebení a měděné jádro zajišťuje intenzivní odvod tepla z tvarových částí formy do míst s temperačními kanály (*viz obr. 2.12*) [71].



**Obr. 2.12** Model tvarové vložky: (a) standardní ocelová vložka, (b) vložka Mecobond [71]

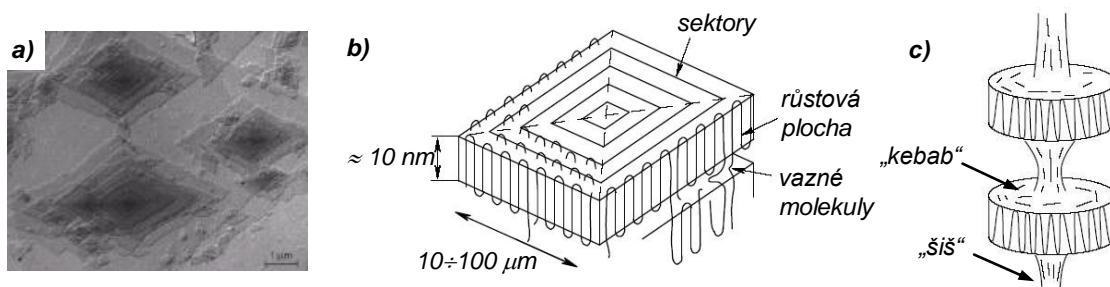
1- ocelový povrch (kalený), 2- měděné jádro, 3- temperační kanály, 4- výstřik

### 3 PŮSOBNÍ TEPELNÝCH PROCESŮ NA MORFOLOGII VÝSTŘIKŮ

Studium morfologie polymerů se v přeneseném slova smyslu zabývá uspořádaností v polymerních soustavách na nadmolekulární úrovni a je důležité nejen z teoretického hlediska, ale svůj bezprostřední význam má i praktický, neboť mnohé z užitných vlastností polymerů závisí ve značné míře právě na jejich morfologii [72]. Vzhledem k použitému polymeru při výzkumu teplotních polí, struktury a vlastností výstřiků (*v souvislosti s aplikací nekonvenčních metod chlazení - temperování vstřikovacích forem*), je tato kapitola věnována výhradně morfologii semikrystalických polymerů, u nichž jsou makromolekuly schopny vytvářet pravidelné vypřímené konformace a v prostoru částečně pravidelnou strukturu (*morfologie polymerních směsí není předmětem této kapitoly*). Morfologie polymeru zahrnuje takové faktory, jako je stupeň krystalizace (*obsah krystalického podílu ve struktuře polymeru*), tvar krystalitů, jejich velikost, vzdálenost, apod. V konečné podobě je morfologie polymerů dána nejen strukturními předpoklady (*chemickým složením, tvarem makromolekul, geometrickou pravidelností řetězců, velikostí mezimolekulárních sil, apod.*), ale také způsobem a procesními podmínkami zpracování polymerů, především technologickými parametry ve fázi chlazení taveniny a tuhnutí vylisku, tak jak dokládají mnohé odborné studie v této oblasti (*viz kap. 3.1.2*).

#### 3.1 Krystalizace polymerů

Základní poznatky o struktuře polymerů přineslo studium polymerních monokrystalů elektronovou mikroskopií. Monokrystaly polymerů lze připravit v laboratorních podmínkách pomalou izotermální krystalizací ze zředěných roztoků (*typicky kolem 0,1%*) [73] a to zpravidla ve tvaru tenkých destiček (*lamel*), které mohou být pyramidálně prohnuté (*viz obr. 3.1a,b*) a v nichž jsou molekuly poskládány téměř kolmo na jejich bazální rovinu, přičemž v důsledku kinetických a termodynamických zákonitostí se mnohonásobně pře-



**Obr. 3.1** Monokrystal polymeru [74-76]

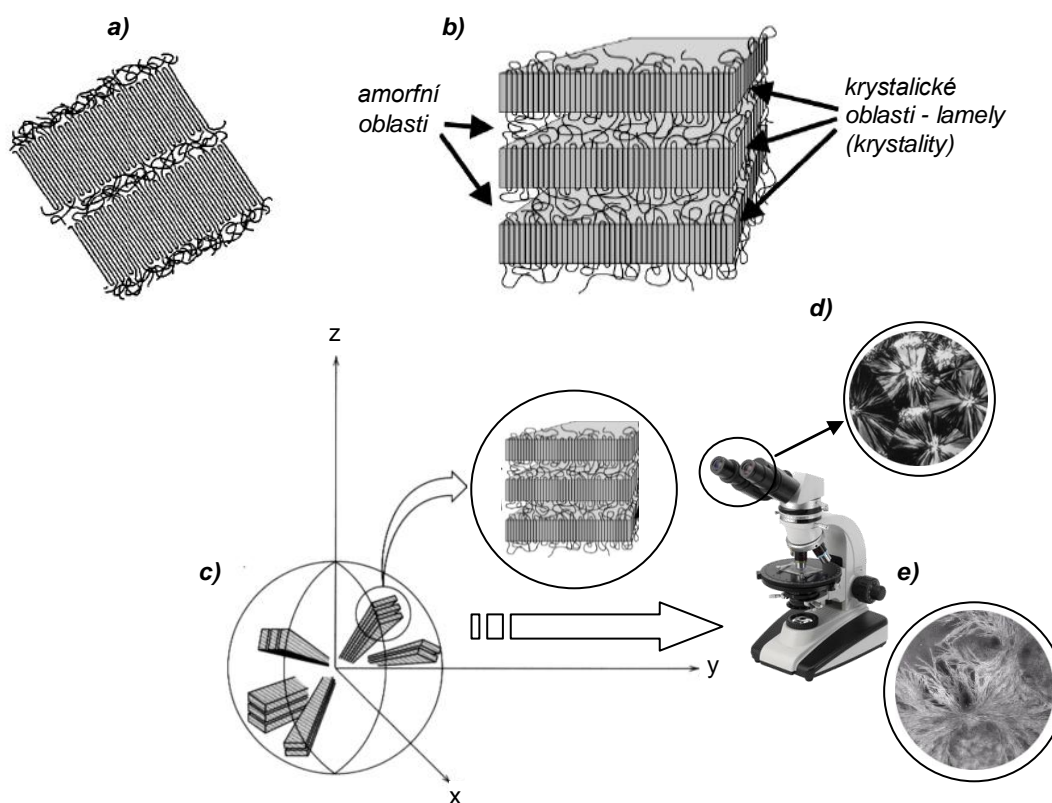
a) lamely PE - snímek TEM, b) lamelární model, c) strukturní model „šiš-kebab“



kládají [2, 31]. Je-li roztok při krystalizaci vystaven smykovému namáhání, vznikají naopak útvary vláknité či jehlicovité, zvané fibrilární, kdy polymerní řetězce jsou orientovány ve směru fibrily. Při krystalizaci z roztoku (*ale i taveniny*) ve smykovém poli se vytvoří zvláštní kombinované krystalické útvary, zvané „šiš-kebab“ nebo „ražniči“ (viz obr. 3.1c). Jádro této struktury je vláknité s obsahem značného podílu napřímených řetězců a na něm jsou epitaxiálně narostlé krystaly z pravidelně poskládaných řetězců (*lamely*) [2].

### 3.1.1 Kinetika krystalizace polymerů z taveniny

Při krystalizaci z taveniny (*popřípadě z koncentrovaných roztoků*) nejsou podmínky pro vznik monokrystalických lamel příznivé. K růstovým plochám tu přistupují molekuly, které jsou propletené se sousedními molekulami, a to je nepříznivé pro vznik zcela pravidelných struktur [2]. Z lamely některé molekuly vystupují (*na rozdíl od monokrystalu*), procházejí amorfni fází a mohou se zapojit ještě do dalších lamel (viz obr. 3.2a,b). Přítomnost takovýchto vazebních molekul je důležitá pro soudružnost polymeru [31]. Při krystalizaci



**Obr. 3.2** Rovinné (a) a prostorové (b) schéma struktury semikrystalického polymeru s kulovitými agregáty krystalických substruktur - sférolitů (c), zobrazených v polarizovaném světle ve tvaru maltézských křížů (d) a pomocí transmisní elektronové mikroskopie jako dendritické útvary (e) [74, 76-78]

z taveniny (*má-li tavenina při tuhnutí dostatek času*) se tedy molekuly skládají a vytvářejí bočně nedokonale vyvinuté lamelární útvary (*krystality*), které vycházejí ze společného primárního zárodku a rozrůstají se všemi směry (*někdy pravidelně vrtulovitě stočené*) v polykrystalických útvarech, tzv. sférolitech (*viz obr. 3.2c*), jejichž velikost a počet závisí na podmínkách krystalizace (*viz kap. 3.1.1.1 a kap. 3.1.1.2*). Při zkoumání sféroliticky zkrystalizovaného polymeru mezi zkříženými polaroidy (*filtry*) polarizačního mikroskopu (*viz kap. 3.3.2*) byly zjištěny kruhové opticky anizotropní dvojlomné útvary s charakteristickými obrazci tvaru maltézských křížů (*viz obr. 3.2d*) [73, 78], jejichž geometrii a tvar popisuje například LEDNICKÝ [73].

Vliv procesních podmínek na krystalizaci polymeru z taveniny je komplexní funkcí rychlosti chlazení, ale i tlaků a smykových sil, které působí na makromolekuly polymeru [16, 79]. Krystalizační proces se skládá ze dvou fází:

- **nukleace** (*tvorby krystalizačních zárodků*)
- **růstu krystalitů** (*ze zárodků se tvoří termodynamicky stabilní jádra, schopná samostatného růstu*).

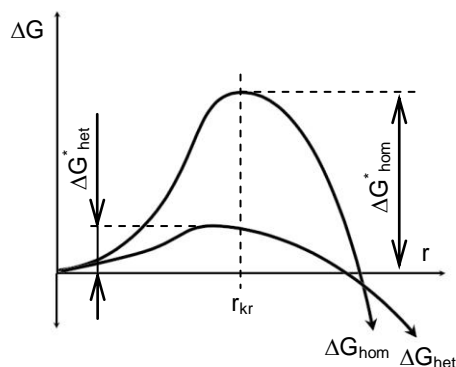
### 3.1.1.1 Mechanismus a rychlost nukleace

Podle nukleační teorie začíná krystalizace vznikem krystalizačních zárodků a pokračuje jejich dalším růstem. Krystalizace taveniny polymeru (*při dané teplotě a tlaku*) probíhá tehdy, je-li děj provázen poklesem Gibbsovy volné energie (*viz rovnice 3.1*) a kdy dochází ke spontánnímu pravidelnému ukládání úseků řetězců ve všech třech směrech. Ve vznikajících krystalických oblastech jsou pak části řetězců uloženy do útvarů, které jsou charakterizovány některou základní krystalickou mřížkou. Polymery krystalizují v teplotním rozmezí mezi přechodovými teplotami tání ( $T_m$ ) a skelného přechodu ( $T_g$ ). Při teplotě tání ( $T=T_m$ ) je změna Gibbsovy volné energie rovna nule (*krystalys jsou s taveninou v rovnováze*).

$$\Delta G = \Delta H_c - T \cdot \Delta S \quad (3.1)$$

kde značí:  $\Delta G$  změnu krystalizační volné energie [J],  $\Delta H_c$  změnu krystalizační entalpie (*uvolněné krystalizační teplo*) [J], jejíž hodnota je záporná, což je pro krystalizační podmínku  $\Delta G < 0$  příznivé,  $T$  termodynamickou teplotu [K] a  $\Delta S$  změnu krystalizační entropie [ $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ ], udávající míru neuspořádanosti soustavy.

Základní hnací silou krystalizace je pokles entalpie taveniny a uvolnění krystalizačního tepla, přičemž pro proces krystalizace je výhodné, aby doprovodný pokles entropie (*ovlivňující konformační děje makromolekul*) nebyl příliš veliký [2, 80]. Změna volné ener-



**Obr. 3.3** Schéma změny Gibbsovy volné energie jako funkce velikosti zárodku [76]

gie při vzniku malého krystalitu (*zárodku*) v závislosti na jeho velikosti je schematicky vyjádřena na obr. 3.3, z něhož je zřejmé, že má-li vzniknout stabilní krystal (*resp. krystalit v podmínkách vstřikování*), musí zárodek překonat oblast kladných hodnot volných energií (*fluktuacemi v podchlazené fázi*) a přejít přes tzv. nukleační bariéru ( $\Delta G^*$ ), kde je krystalizační volná energie maximální a zárodek dosahuje kritické velikosti ( $r_{kr}$ ), viz rovnice 3.2 [76]. Po dosažení

kritické velikosti zárodku začne na jeho povrchu volně růst krystalit. V oblasti, kdy  $\Delta G < 0$ , je zárodek stabilní a stává se malým krystalitem.

$$r_{kr} = \frac{2 \cdot \sigma_e \cdot T_m^o}{\Delta H_m \cdot (T_m^o - T)} \quad (3.2)$$

kde značí:  $r_{kr}$  kritickou velikost zárodku [ $\text{m}^{-2}$ ],  $\sigma_e$  povrchovou energii [ $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$ ],  $T_m^o$  rovnovážnou teplotu tání nekonečně velkého ideálního krystalu [K],  $\Delta H_m$  změnu entalpie tání [J] a  $T$  teplotu ochlazeného polymeru [K].

Rychlost nukleace odvozená Turnbullem a Fisherem s použitím teorie absolutních reakčních rychlostí [2, 80] je vyjádřena následující rovnicí (3.3):

$$I_z = \frac{N^* \cdot k \cdot T}{h} \cdot e^{\left( -\frac{\Delta G^* + \Delta G_\eta}{k \cdot T} \right)} \quad (3.3)$$

kde značí:  $I_z$  počet zárodků vzniklých v objemové jednotce za jednotku času [ $\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $N^*$  počet krystalizace schopných jednotek v objemové jednotce [ $\text{m}^{-3}$ ],  $k$  Boltzmannovu konstantu [ $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  $h$  Planckovu konstantu [ $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ],  $T$  termodynamickou teplotu [K],  $\Delta G^*$  změnu energie nukleační bariéry [J], tj. nejmenší práci potřebnou pro vznik nukleačního zárodku o kritické velikosti a  $\Delta G_\eta$  změnu aktivační volné energie transportu polymerních segmentů [J].

Nukleační proces vyjádřený rovnicí (3.3) je nazýván **homogenní (termální) nukleací** (*bez přítomnosti předem vytvořených zárodků nebo cizích povrchů v soustavě*), jejíž rychlost je určována součtem nukleační a transportní volné energie a při přechodových teplotách zesklenní a tání je nulová, neboť uvedený součet volných energií je nekonečný. Při homogenní nukleaci, která je však v reálných podmínkách velmi málo častým je-



vem, se krystalizační zárodky tvoří náhodně v čase i v objemu polymeru a vznikají v důsledku termické fluktuace hustoty matečné fáze [75].

V polymeru jsou však často přítomny heterogenní látky s póry nebo dutinami na povrchu (*nečistoty, zbytky krystalitů neúplně roztaveného polymeru, nukleační činidla, pigmenty, vyztužující vlákna, stabilizátory, náhodné nečistoty, prach, aj.*), v nichž mohou přetrvávat krystalické zárodky i značně vysoko nad teplotou tání, které pak působí jako centra růstu v okamžiku, kdy se tavenina ochladí pod teplotu tání [2, 81]. Nukleace tohoto typu je označována jako **heterogenní (atermální) nukleace** a pro polymery používané v průmyslové praxi je často velmi typická, neboť pro polymerní výrobky, především pak v automobilovém průmyslu, je časté, že k polymeru kromě pigmentů jsou přidávána skelná vlákna, teplotní stabilizátory nebo také talek, což je minerální plnivo na bázi křemičitanu, které zvyšuje tvarovou a rozměrovou přesnost výlisků (*snižuje velikost jejich smrštění*), ale plní také funkci nukleačního činidla s veškerými vlivy na morfologii polymeru i jeho následné vlastnosti (*viz kap. 3.2*). Nukleanty jsou v technické praxi užívány pro řízené ovlivnění procesu krystalizace polymerů za účelem zvýšení rychlosti jejich solidifikace během zpracování. Nukleační bariéra je v porovnání s homogenní nukleací v tomto případě menší (*viz obr. 3.3*) a za izotermních podmínek je rychlost heterogenní nukleace závislá nejen na teplotě, ale také na krystalografické a chemické struktuře cizích látek v tavenině. Nejběžnějšími nukleanty jsou minerální aditiva, organické soli nebo polymery [73]. Rychlost nukleace se v reálných podmínkách vstřikování zvyšuje s poklesem teploty taveniny [76], s nárůstem vstřikovacích tlaků [16], ale také při orientaci makromolekul [16, 79], jejichž teplota tání (*definovaná vztahem 3.1*) je vyšší, neboť mají nižší entropii (*zatímco změna jejich entalpie je malá*) a při dané teplotě krystalizace mají orientované makromolekuly větší přechlazení (*vyjádřeno rozdílem teplot tání a krystalizace*) a tedy větší hnací sílu nukleace.

### 3.1.1.2 Růst krystalitů

Růst makroskopicky pozorovatelných krystalitů (*krystalických oblastí, které nejsou tak dokonalé jako skutečné krystaly*), resp. poloměrů sférolitických substruktur při krystalizaci taveniny je možné sledovat v polarizačním mikroskopu a v mnoha případech izotermní krystalizace bylo ověřeno, že poloměr sférolitů roste lineárně s časem [73, 81, 82]. Jakmile je vytvořen zárodek, z něhož se tvoří termodynamicky stabilní jádro schopné samostatného růstu, zbytek molekuly se rychle naskládá na růstové ploše a růst probíhá po vrstvách (*vrstvením dvourozměrných povrchových jader*) a vzniká tak lamelární útvar, jehož tloušťka (*daná periodou skládání makromolekul*) závisí na teplotě krystalizace (*ex-*

*ponenciálně*). Při nižší teplotě krystalizace vznikají tenčí lamelární krystality a dochází k vícevrstvé nukleaci na základní lamele dříve, než tato dorostla. Pokud se takto získaný polymer následně temperuje na vyšší teplotu (*zpravidla táním a rekrytalizací*), dochází ke vzniku tlustších lamel [83].

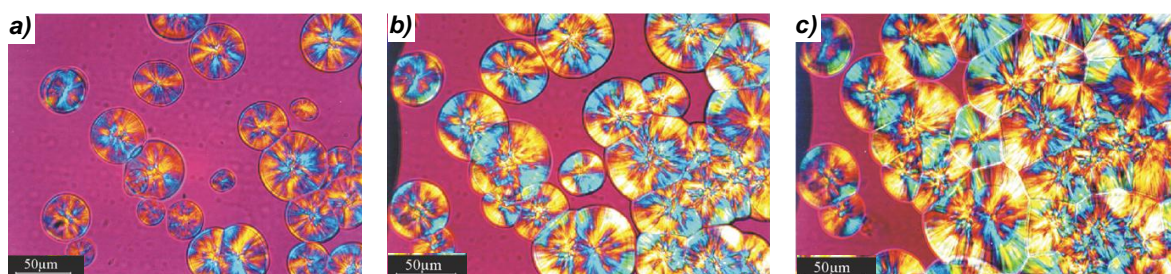
Z teoretického rozboru plyne, že lineární rychlost růstu krystalitů není spojena s difuzí na rozhraní krystal – tavenina (*na rozdíl od krystalizace z roztoků*), ale je úměrná rychlosti sekundární nukleace na rostoucím povrchu sférolitu [2] a lze ji vyjádřit rovnicí (3.4), která je formálně totožná s rovnicí pro homogenní nukleaci (3.3):

$$r = r_o \cdot e^{\left( \frac{\Delta G_s^* + \Delta G_\eta}{k \cdot T} \right)} \quad (3.4)$$

kde značí:  $r$  radiální rychlost růstu plochy sférolitů [ $\mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ],  $\Delta G_s^*$  změnu energetické bariéry sekundární krystalizace [J],  $\Delta G_\eta$  aktivační volnou energii transportu polymerních segmentů [J],  $k$  Boltzmannovu konstantu [ $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ ] a  $T$  termodynamickou teplotu [K].

Z rovnice (3.4) plyne, že rychlost růstu krystalitů v závislosti na teplotě dosahuje výrazného maxima v oblasti mezi ( $T_g$ ) a ( $T_m$ ) a konstantní je pouze za izotermních podmínek (*charakteristický zvonkový průběh*). Největší rychlosti růstu krystalitů je dosahováno při teplotě, která empiricky odpovídá přibližně hodnotě  $0,82 \cdot T_m$  [2]. Hodnota nejvyšší rychlosti růstu krystalitů je kriticky závislá na ohebnosti řetězců makromolekul (*rychlosti změn konformačních dějů*), přičemž se snižující se ohebností řetězců tato klesá [2]. V teoretických publikacích však existují přesnější rovnice teplotní závislosti rychlosti růstu krystalitů, které dosahují dobrého souhlasu s měřenými závislostmi, vycházející například z LAURITZEN-HOFFMANOVY teorie [83].

Růst krystalitů končí dotykem se sousedním rostoucím krystalitem, což lze doložit sledováním vzniku a růstu sférolitů při krystalizaci v polarizačním mikroskopu (*viz obr. 3.4*). Na styčné ploše sférolitů, po vzájemném setkání, dochází k prorůstání lamel, což je příznivé pro soudružnost hmoty a sférolity dorůstají do polyedrálních útvarů.



**Obr. 3.4** Průběh izotermní krystalizace PP bez nukleačních činidel při  $T=473 \text{ K}$  (SM) [84]

a) po 15 min; b) po 65 min; c) po 115 min

Špatně krystalizující materiál je při růstu sférolitů vytlačován do mezilamelárního, popř. mezisférolitického prostoru. Při krystalizaci tak dochází současně i k frakcionaci polymeru a na hranicích sférolitů se vytvoří tenký film odlišný od materiálu uvnitř sférolitu, který je pak slabým místem polymeru, kde je často iniciován lom [27].

### 3.1.1.3 Celková rychlost krystalizace

Celková rychlost krystalizace polymeru z taveniny, vyjádřena nárůstem krystalinity za časovou jednotku (*tj. obsahem krystalicky uspořádaných oblastí v semikrystalické soustavě*), je dána rychlostí procesu nukleace a růstu sférolitů (*krystalitů*), viz obr. 3.5. Krystalizace přitom vykazuje rysy typické pro dvoustupňovitý proces. V prvním stupni, při tzv. **primární krystalizaci** (*ve fázi tuhnutí taveniny*) proběhne největší část přeměny. Na něj pak navazuje mnohem pomalejší druhý stupeň, takzvaná **sekundární (studená) krystalizace**, která se projevuje v posledních stádiích primární krystalizace (*po setkání sférolitů*) i po výrobě polymerního dílu nebo např. při jeho temperaci za vyšších teplot, než je teplota okolí. Během sekundární krystalizace dochází k pomalému uspořádávání materiálu, který byl vypuzen pro špatnou krystalizační schopnost z primárních krystalitů a začleňuje se do již existujících lamel, čímž se jejich tloušťka zvětšuje. V průmyslové praxi má sekundární krystalizace velký význam, neboť představuje další, obvykle nežádoucí tvarové a rozměrové změny výrobků, včetně změn jejich fyzikálních vlastností. Průběh a rozsah sekundární krystalizace je výrazně ovlivněn tepelnou historií zpracování polymeru.

Časový průběh izotermní, primární krystalizace je obecně popsán Avrami-Evensiho rovnicí (3.5):

$$\chi_c = 1 - e^{\left(-Kt^{cn^*}\right)} \quad (3.5)$$

kde značí:  $\chi_c$  stupeň přeměny při primární krystalizaci v době krystalizace (*podíl krystalické fáze*) [1],  $K$  a  $n^*$  konstanty, související s nukleačním a růstovým mechanismem, viz [73], přičemž  $n^*$  nabývá podle typu nukleace a růstu hodnot 1 až 4 a  $t^c$  dobu krystalizace [s].

Pro okamžitou nukleaci s určitou koncentrací zárodku a sférolitický (*kulový*) růst s lineární rychlostí růstu je parametr ( $K$ ) v Avrami-Evensiho rovnici dán výrazem (3.6) a Avramiho exponent  $n=3$  (*pro případ heterogenní nukleace*) [85]. Je třeba však uvést, že jen zřídka je nukleace výhradně pouze heterogenní nebo homogenní, obvykle dochází k více či méně současné nukleaci oběma těmito mechanismy [73].

$$K = \frac{4}{3} \pi \cdot N^* \cdot r^3 \quad (3.6)$$

strana 52

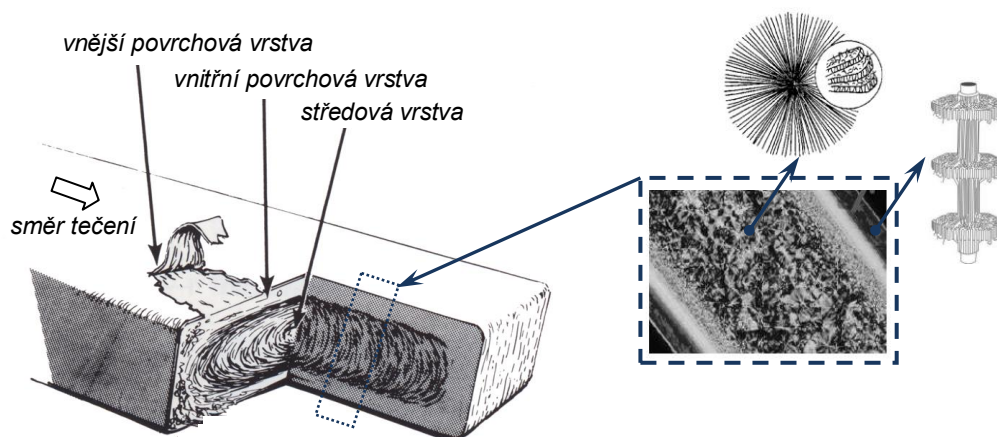
Konečná velikost sférolitů, která se významným způsobem podílí na výsledných mechanických vlastnostech polymerního dílu (viz kap. 3.2), závisí nejen na teplotě krystalizace, ale v případě heterogenní nukleace také nepřímo úměrně na koncentraci krystalizačních zárodků (viz obr. 3.5). V případě heterogenní nukleace, kde všechny sférolity vyrůstají od počátku krystalizace současně (*na rozdíl od homogenní nukleace, kde vznikají postupně*), je při izotermní krystalizaci dosahováno prakticky stejných jejich rozměrů [79]. Vnitřní morfologie sférolitu je určena především difuzí a krystalizační rychlostí. Při pomalé krystalizaci rostou dokonale vyvinuté sférolity, složené z rozměrných lamel. Opačným případem jsou dendritické sférolity, vznikající při rychlé krystalizaci [83].

### 3.1.2 Heterogenní krystalická morfologie reálných výstřiků

Komplexní morfologie výstřiku vzniká postupně během zpracovatelského procesu, tedy při plnění dutiny formy, dotlaku a fázi chlazení výstřiku. Za podmínek neizotermického toku dochází u semikrystalických výstřiků v důsledku smykového a teplotního gradientu v dutině formy (*kteří se mění po průřezu i délce tokové dráhy*) ke vzniku rozdílných charakteristických struktur na jejich povrchu a v jádře (tzv. „*skin-core*“ efekt) a to v závislosti na procesních parametrech vstřikování, vzdálenosti od ústí vtoku a geometrii výstřiku (*jiná je v hranách a rovných úsecích, ale také na vnějším a vnitřním povrchu hrany*) [87]. Základní studie v této oblasti uveřejnili KANTZ, CLARK, aj., kteří zavedli pojmy: slupka neboli povrchová vrstva, mezivrstva a jádro (*středová vrstva*). Jednotlivé vrstvy struktury výstřiku mění ve směru plnění od ústí vtoku svoji tloušťku, tvar, morfologii i krystalinitu. Nápadné je zvláště zmenšování, případně vymizení sférolitů, doprovázené změnami jejich typu a charakteru mezisférolitického rozhraní, případně krystalové modifikace. Vznik konkrétní morfologie v jednotlivých vrstvách výstřiku je reprodukovatelný [87].

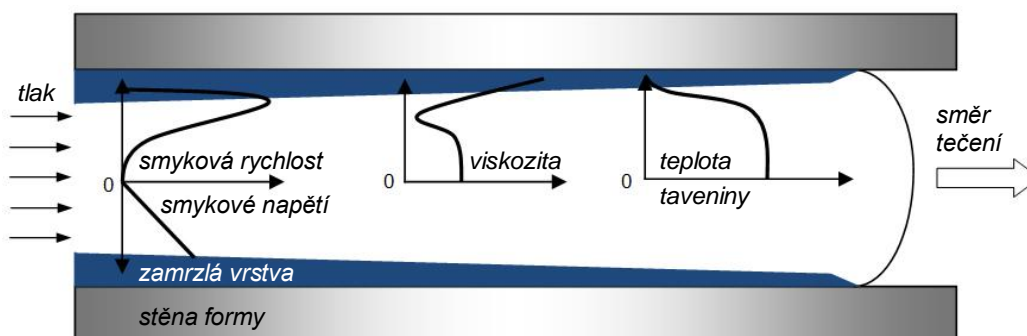
Během plnění dutiny formy taveninou plastu se teplota taveniny pohybuje nad teplotním intervalem krystalizace. To však neplatí pro tu část materiálu, která je v bezprostřední blízkosti stěny formy, kde dochází k zatuhnutí povrchové vrstvy tak, jak bylo uvedeno v kapitole 2.2. **Povrchová vrstva** (viz obr. 3.6) je tvořena z vysoce orientovaných makromolekul (*vzhledem k elongačním deformacím působícím při fontánovém toku*), které krystalizují s velmi nízkou nebo nulovou molekulární relaxací [16] a u polypropylenových vzorků bylo zjištěno, že se skládá z několika dvojlomných vrstviček tvořených velmi malými sférolity, jejichž přechod je obtížně postřehnutelný a jejichž tloušťka a samotná existence je určena proměnnými vstřikovacího procesu [90]. V polarizovaném světle optického mikroskopu se povrchová vrstva výstřiku jeví jako bílá beztvará vrstva, jejíž tloušťka je ovlivněna rychlostí chlazení (*s rostoucí rychlostí chlazení se zvětšuje*). Na zá-

kladě odborných studií [90-94] lze konstatovat, že se snižující se teplotou taveniny, teplotou formy a dobou chlazení se tloušťka povrchové vrstvy výstřiku zvětšuje, obdobně také s klesající rychlostí plnění dutiny formy taveninou plastu i vstřikovacím tlakem. U orientovaných polymerů se nukleace může objevit podél proudnic (tzv. *nukleace v řadě*), kde krystality nukleují na centrální páteři orientovaných řetězců a narůstají napříč napěťovým polem. Povrchová vrstva výstřiku, která je vysoce orientovaná, je tvořena krystality „šiš - kebab“ (viz obr. 3.6) [27].



**Obr. 3.6** Model struktury výstřiku krystalizujícího polymeru [74, 88, 89]

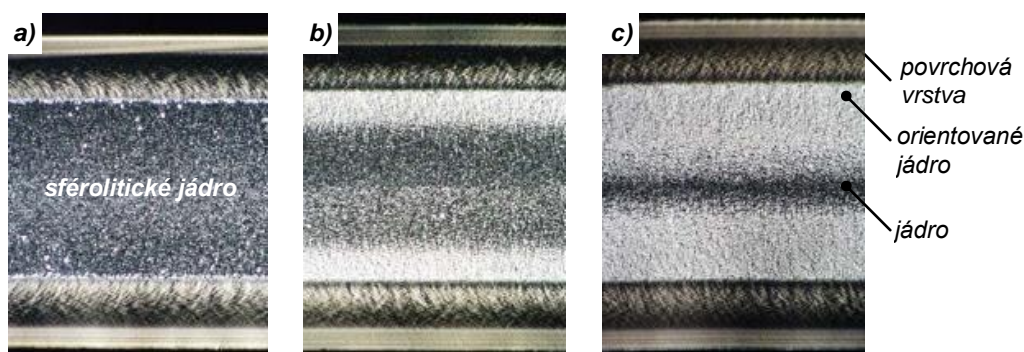
Další tok taveniny do dutiny formy probíhá mezi povrchovými vrstvami a tento smykový tok podporuje také orientaci, která se mění v závislosti na velikosti smykového rychlosti z maximální - v blízkosti ztuhlé povrchové vrstvy, na minimální - uprostřed dutiny formy (viz obr. 3.7). Orientační distribuci napříč tloušťkou materiálu v okamžiku zaplnění dutiny formy lze přibližně určit součtem elongační a smykové orientace [16].



**Obr. 3.7** Termomechanické prostředí ve fázi plnění dutiny vstřikovací formy taveninou plastu [95]



Při tuhnutí taveniny v dutině formy se od stěn formy posouvá čelo krystalizace přes tloušťku materiálu směrem k jádru výstřiku. Rychlost posunu čela krystalizace se mění v závislosti na místních podmínkách: teplotě, orientaci makromolekul a tlaku. Vývoj vnitřní struktury během fáze dotlaku tak závisí na rychlosti chlazení, ale také na rychlosti a velikosti tlaku vyvinutého ve formě po jejím naplnění (viz obr. 3.8), tak jak dokládají výsledky studie prezentované pod odkazem [96]. Pokud dochází k pomalému nárůstu dotlaku nebo pokud je rychlost chlazení nízká (*např. při vysoké teplotě taveniny nebo formy*) dochází k relaxaci orientace makromolekul a to až do okamžiku, dokud se teplota taveniny nesníží natolik, aby mohla začít krystalizace. U izotaktického polypropylenu (*který je polymorfní a může krystalizovat ve třech krystalografických modifikacích:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$* ) to znamená, že bude převládat nejstabilnější krystalická fáze  $\alpha$  (*monoklinická soustava, předpokládá se, že v její základní krystalové buňce jsou sousední řetězce uloženy vždy s opačným smys-*



**Obr. 3.8** Mikrostrukturní složky výstřiku z PP při teplotě formy 24 °C v závislosti na velikosti dotlaku (SM) [96]

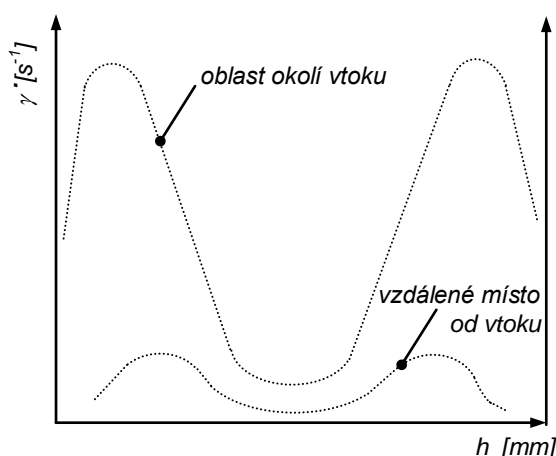
a) 12 MPa, b) 25 MPa, c) 40 MPa

*lem šroubovice*). Pokud by bylo chlazení taveniny rychlé nebo pokud dochází k rychlému nárůstu tlaku, vytvoří se řadově nukleované sférolity (*v důsledku přítomnosti hydrodynamického pole*) [90], obsahující nestabilní  $\beta$  krystalickou fázi polypropylenu (*hexagonální soustava, sousední segmenty řetězců jsou uspořádány se stejným smyslem šroubovic, po temperaci vzorku přechází v modifikaci  $\alpha$* ), neboť nevzniknou příznivé podmínky pro dostatečnou dezorientaci makromolekul [16, 18, 27, 96]. Tato vrstva je v popisu mikrostrukturních složek často nazývána **přechodovou, smykovou** nebo **transkrystalickou vrstvou** (*vytvářející se při krystalizaci během dotlaku*) a je výsledkem sdruženého působení rychlého odvodu tepla charakteristického pro povrch výstřiku a pomalého odvodu tepla z oblasti jádra výstřiku. Pro hodnocení vlivu jednotlivých vrstev mikrostruktury na vlastnos-

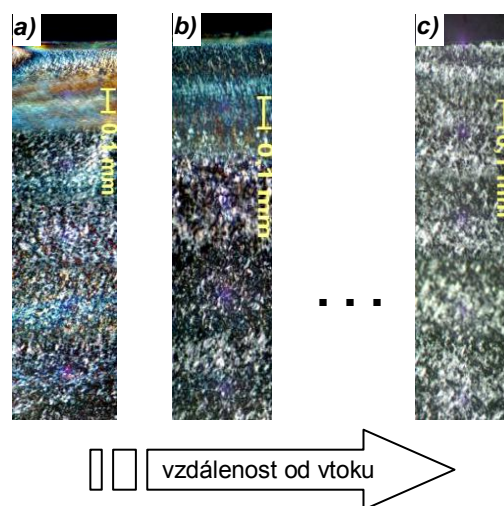
ti výstřiku je v praxi za celkovou povrchovou vrstvu považován součet tloušťek přechodové a povrchové vrstvy [97].

V přechodové oblasti mezi ztuhlou vrstvou a tekoucí taveninou ve středu, která je lépe pozorovatelná v řezu rovnoběžném s tokem taveniny, se tak může objevit orientace ve směru toku v důsledku smyku v této oblasti. Čím déle materiál daným průřezem protéká, tím více narůstá orientace materiálu v tomto průřezu. Maximální orientace ve směru toku je však vždy u stěny formy (v *povrchové vrstvě výstřiku*).

V oblasti středu (*jádra*) výstřiku je rychlost chlazení relativně nízká, po zatuhnutí vtoku (*při krystalizaci ve fázi chlazení*) tlak v dutině formy klesá a **středová vrstva** polymeru v oblasti jádra má jen velmi nízkou nebo žádnou orientaci, krystalizace se zpomalí a vznikají sférolity bez jakékoliv orientace. V případě polypropyleny vznikají sférolity krystalické fáze  $\alpha$ . Z teorie krystalizace je zřejmé, že velikost vytvářených sférolitů vzrůstá při nižších rychlostech chlazení (*vyšší teplotě taveniny nebo formy*, viz obr. 3.5). V oblasti jádra výstřiku jsou podmínky pro růst sférolitů nejvíce příznivé, neboť teplota taveniny v této oblasti dosahuje nejvyšších hodnot (viz obr. 3.7). Tloušťka středové vrstvy je do značné míry ovlivněna technologickými podmínkami vstřikování. Její velikost narůstá při rychlejší plnění dutiny formy i pomalejší chlazení [92] a postupně se v důsledku poklesu tlaku i smykových rychlostí od ústí vtoku ve směru plnění zvětšuje (viz obr. 3.9 a obr. 3.10). V jádře, v místech blíže slupky, se často vedle obvyklých sférolitů (*s pozitivním dvojlomem*) vyskytují typické svítící sférolity (*metastabilní hexagonální forma s negativním dvojlomem*) [90].



**Obr. 3.9** Průběh smykové rychlosti v závislosti na tloušťce výstřiku a vzdálenosti od vtoku [98]



**Obr. 3.10** Heterogenní krystalická morfologie polymeru v závislosti na vzdálenosti od vtoku (SM) [98]

a), b) výrazná povrchová vrstva, c) nevýrazná povrchová vrstva



### 3.2 Vliv morfologie polymerů na výsledné vlastnosti výstřiků

Z hlediska morfologie polymerů jsou výsledné vlastnosti výstřiku závislé především na třech faktorech:

#### ▪ **stupni krystalinity**

Se zvyšujícím se stupněm krystalinity (*obsahem krystalického podílu ve struktuře*) se u výstřiků zvyšuje jejich hustota, modul pružnosti, rázová houževnatost a pevnost, zatímco tažnost výstřiků se snižuje. Nejvyššího stupně krystalinity je dosaženo při maximální rychlosti růstu krystalitů (*sférolitů*), které je dosahováno při zcela konkrétní teplotě, resp. teplotním rozsahu odpovídající maximu v teplotním intervalu mezi teplotou tání a skelného přechodu [2]. Teplota krystalizace se posouvá k vyšším hodnotám, pokud je zvýšena rychlost nukleace, např. nárůstem orientace makromolekul, tlaku nebo použitím nukleačních činidel. Výsledná hodnota stupně krystalinity u vstřikovaných výrobků je závislá nejen na strukturních předpokladech polymeru (*molekulární struktuře*), ale také na technologických podmínkách zpracování, tak jak dokládají mnohé studie, uvedené např. pod odkazy [92, 99], zejména pak na teplotě vstřikovací formy a velikosti dotlaku. Stupeň krystalinity u semikrystalických výstřiků (*ve středové oblasti*) roste se zvyšující se teplotou formy [92, 100, 101] a se snižující se velikostí dotlaku [92, 99].

Obdobně jako morfologie reálného výstřiku a jeho vlastnosti, tak také zastoupení krystalické fáze ve výstřiku se může měnit ve směru toku taveniny, ale také směrem od povrchu k vnitřním objemům tělesa. Tato závislost může ovlivnit i rozložení mechanických charakteristik. Podle Avrami-Evensiho rovnice (*viz rovnice 3.5*) je stupeň krystalinity funkcí času, rychlosti tvorby zárodků a rychlosti růstu krystalitů. Mnohé odborné studie prokázaly, že i povrchová vrstva výstřiku je krystalická [73] a na základě odborné studie, uvedené pod odkazem [102], je možné konstatovat, že vyššího stupně krystalinity lze zaznamenat v povrchové vrstvě výstřiku, než v jeho jádře, přičemž na povrchu stupeň krystalinity se směrem od ústí vtoku klesá, takže na povrchu u ústí vtoku má výstřik nejvyšší stupeň krystalinity, neboť je zde největší podchlazení taveniny (*ukázalo se, že tuto skutečnost neovlivní přítomnost plniva ani druh vazby mezi fázemi*). Změny stupně krystalinity podél délky výstřiku lze přisoudit rozdílné době chlazení jednotlivých objemů výstřiku. Nejprve zchladnou objemy výstřiku na opačném konci od ústí vtoku, potom objemy u ústí vtoku, které jsou ve fázi dotlaku stále ve styku s taveninou. Hodnota stupně krystalinity v povrchové a středové vrstvě výstřiku se liší v závislosti na technologických podmínkách vstřikování (*teplotě a tlaku*), mnohdy však nepatrně [92, 99, 100].

Praktické uplatnění nehomogenity ve stupni krystalinity lze očekávat v chování materiálu při zatěžování. Konkrétně povrchové vrstvy vzorku, které mají vyšší stupeň krysta-

linity, budou mít proti vnitřním objemům vyšší modul pružnosti. Při stejné deformaci celého vzorku v nich bude vznikat vyšší napjatost než v ostatních objemech výstřiku. Za této situace mohou přednostně popraskat povrchové vrstvy a vzniklá porušená místa se mohou stát zárodky případného lomu [102].

▪ ***tloušťkách jednotlivých vrstev heterogenní morfologie***

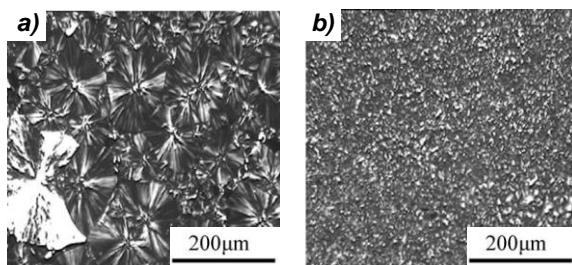
V případě jednoosého zatěžování výstřiku jsou jeho výsledné mechanické vlastnosti, ale také rozměrová a tvarová přesnost ovlivňovány orientací makromolekul v povrchové vrstvě výstřiku [96, 97]. Modul pružnosti a mez pevnosti výstřiku budou větší, jsou-li měřeny ve směru toku taveniny, avšak hodnoty závisí také na tloušťce jeho povrchové vrstvy. Naopak při biaxiálních testech se na výsledných mechanických vlastnostech více podílí přechodová (*smysková*) a středová vrstva (*jádro*). Smyková vrstva, v případě polypropylenů tvořená sférolity  $\beta$ -fáze (*nukleovanými v řadě*), se vyznačuje nízkou houževnatostí, a proto je porušení materiálu iniciováno v této vrstvě [16]. Výstřiky vyrobené za podmínek, které minimalizují vznik smyskové vrstvy (*zvětšují středovou vrstvu*), vykazují proto zvýšený modul pružnosti. Počátek lomu pak vzniká na hranicích sférolitu ve středové vrstvě výstřiku.

Velikost jednotlivých vrstev mikrostruktury polymeru je rovněž závislá na technologických podmínkách vstřikování, tak jak již bylo uvedeno v kap. 3.1.2, zejména teplotě taveniny, teplotě formy, době chlazení, rychlosti vstřikování a vstřikovacím tlaku. Na základě rešeršních poznatků lze shmout, že u homopolymerů se velikost povrchové a přechodové vrstvy výstřiku snižuje s rostoucí teplotou taveniny [97, 103, 104], teplotou formy [26, 92, 93, 97], dobou chlazení [93], vstřikovací rychlostí [97] i vstřikovacím tlakem [92, 103]. V případě kopolymerů tato výše popisovaná změna u přechodové vrstvy výstřiku vždy neplatí, tak jak bylo prokázáno při hodnocení struktury a vlastností např. u kopolymeru PP/PE [103].

▪ ***velikosti a tvaru sférolitů (krystalitů)***

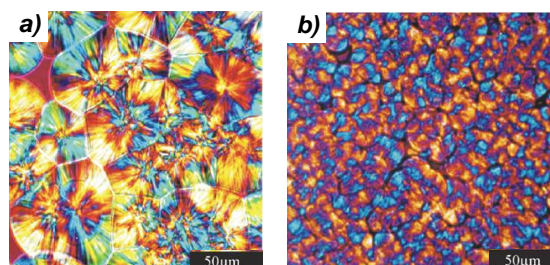
Velikost sférolitů dosahuje hodnot desítek mikrometrů, v některých případech až několika milimetrů. V případě polypropylenů je výrazně menších rozměrů krystalických útvarů dosaženo při srovnání izotaktického a syndiotaktického polypropylenů právě u syndiotaktického typu (*viz obr. 3.11*) [105]. Z hlediska mechanických vlastností (*vyšší meze pevnosti, modulu pružnosti a rázové houževnatosti*) je přítomnost sférolitů nežádoucí, protože takovéto polyedrální útvary působí jako koncentrátoři napětí a iniciátory lomu [106]. Odolnost proti vzniku lomu v oblasti středové vrstvy výstřiku, který je iniciován z defektů a trhlinek, které se vytvořily již při krystalizaci (*neboť jednotlivé modifikace krystalografických soustav krystalizují s různou rychlostí*), je možné zvýšit zmenšením velikosti sférolitů pomocí nukleačních činidel (*viz obr. 3.12*), která bývají v technické praxi velmi

často do polymeru přidávána (*případ heterogenní nukleace*), neboť nabízejí jednu z možností, jak cíleně ovlivňovat morfologii semikrystalických polymerů [84, 107]. Přidáním nukleačních činidel začíná navíc krystalizace na vyšší teplotě, čímž dochází rovněž k nárůstu obsahu krystalického podílu ve struktuře výstřiku [107].



**Obr. 3.11** Sfěrolitická struktura PP (SM) [105]

a) izotaktický PP, b) syndiotaktický PP



**Obr. 3.12** Sfěrolitická struktura PP (SM) [84]

a) bez talku, b) nukleovaný talkem (0,5 %)

### 3.3 Metody studia morfologie polymerů

Pro studium morfologie polymerů lze použít řadu vhodných fyzikálních metod: difrakci záření X, metodu hustotního vážení, termodynamické metody, metody spektrometrie, polarizační nebo elektronovou mikroskopii, apod. O použití konkrétní metody vždy rozhoduje sledovaná veličina struktury polymerů. Vzhledem k cílům disertační práce jsou v následujících kapitolách popsány pouze ty metody, jež byly použity pro jejich stanovení.

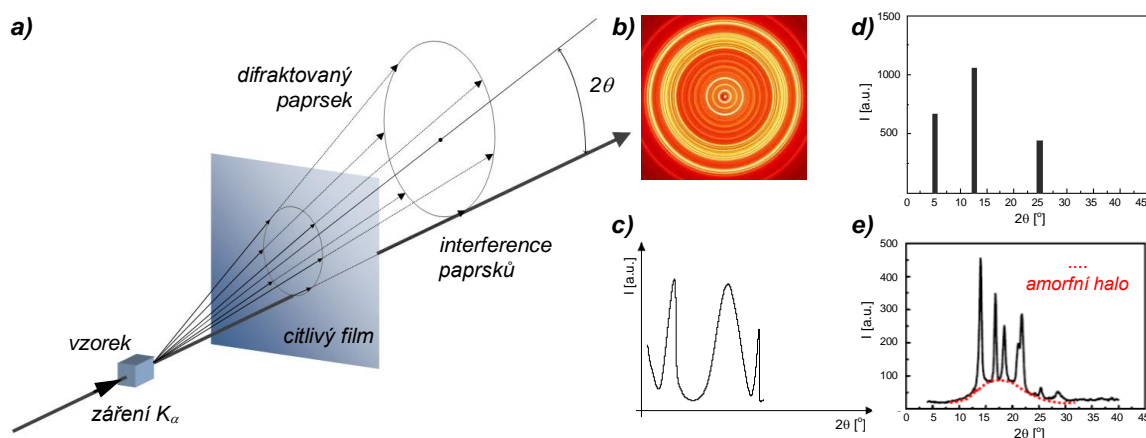
#### 3.3.1 Rentgenová difrakce

Rentgenová difrakce je považována za základní metodu studia fázové a krystalické struktury polymeru. Potřebný svazek rovnoběžného RTG záření, nejlépe monochromatického záření X, poskytuje řada různých experimentálních metod. Difraktované záření je zaznamenáváno fotograficky na filmu, vyžadující denzitometrické vyhodnocení nebo s využitím počítačových goniometrických postupů na difraktogramech, difrakčních křivkách (*záznamech rozložení intenzity rozptýleného záření v prostoru*), z nichž lze odvodit prostorové uspořádání atomů, stupeň krystalinity ad. (*viz obr. 3.13*) [2, 108].

Při vzájemném působení s polymerem je záření X, které vzniká při dopadu elektronů na povrch anody rentgenové trubice (*emitovaných z katody žhavené elektrickým proudem a urychlovaných anodovým vysokým napětím 20 V až 50 kV*), absorbováno a rozptýlováno bez změny vlnové délky (*koherentní rozptyl*) a se změnou vlnové délky. Pro výzkum a strukturní studium polymerů se nejčastěji používá záření Cu K $\alpha$  o vlnové délce 0,154 nm (*linie charakteristického záření K $\beta$  je odstraněna např. filtrováním vhodnou kovovou fólií*) a využíván je koherentní rozptyl paprsků, neboť při něm se vlnová délka ne-

mění a navíc se neztrácí fázový vztah mezi primárním a rozptýleným paprskem [81, 108, 109]. Maximum rozptýleného záření pozorujeme ve směrech splňující podmínku pro souhlasnou interferenci, tzv. Braggovu rovnici.

Při dopadu monochromatického záření na vzorek polymeru s náhodně orientovanými krystalitami (*neorientovaný polymer*), u něhož jsou některé krystality orientovány tak, že směr primárního svazku a orientace některé osnovy atomových rovin splňují Braggovu rovnici, jsou získány reflexy pro všechny možné osnovy atomových rovin (*jejich vzdálenost musí být větší než  $\lambda/2$* ), které dají vzniknout soustavě kuželů odražených paprsků souosých s primárním svazkem (viz obr. 3.13). V případě záznamu na rovinný fotografický papír se získají difrakční obrazce ve formě soustředných kružnic, které jsou u neorientovaného semikrystalického polymeru složeny z řady ostrých maxim (v případě záznamu na difraktogram z řady ostrých píků při různých úhlech  $2\theta$  v různé intenzitě), ale také zeslabeného difúzního amorfního rozptylu (tzv. *amorfního halo*), jehož intenzita klesá úměrně s klesajícím obsahem amorfní složky (viz obr. 3.13b). Počet reflexních kruhů je u polymeru poměrně malý a často leží velmi blízko sebe, neboť mezirovinové vzdálenosti jsou poměrně velké, takže reflexní úhly jsou malé. Vzhledem ke skutečnosti, že u reálných polymerů je krystalová mřížka nedokonalá a krystality jsou malé, jsou reflexní kruhy rozšířeny a často se vzájemně překrývají [81, 109].



**Obr. 3.13** Princip vzniku difrakčního obrazu [112]

a) princip Debye Scherrerovy metody, b) difraktogram (2D), c) difrakční křivka (1D),  
d) difrakční křivka monokrystalu, e) difrakční křivka polykrystalu

U orientovaného polymeru se kružnice mění na stopy srpkovitého tvaru (*popřípadě body, podle stupně orientace*), neboť orientace polymeru narušuje původní nahodilou prostorovou orientaci krystalitů [110, 111]. V případě amorfního polymeru má rentgenogram

pouze nevýrazné difúzní pásy, které jsou způsobeny jistou pravidelností ve vzdálenosti nejbližších sousedů daného atomu [2].

Při hodnocení vzorků z rentgenogramů je nutno posuzovat: počet, polohu a relativní intenzitu reflexních kružnic, které jsou charakteristické pro každý krystalizující polymer, šířku a ostrost reflexních kružnic, které jsou vodítkem pro posuzování velikosti a pravidelnosti krystalických oblastí (*čím ostřejší a užší linie, tím jsou krystality větší a dokonalejší*) a také intenzitu amorfního difúzního rozptylu pozadí, která roste se vzrůstajícím obsahem amorfní fáze [81].

Z experimentálních a teoretických důvodů jsou rozptylové efekty paprsků X rozděleny na oblasti velkých úhlů (tzv. *širokoúhlá difrakce*, WAXS), které dávají rychlé, reprodukovatelné a kvantitativní výsledky bez zvláštních nároků na přípravu vzorků nebo jejich porušení a oblasti malých úhlů, menších než  $2^\circ$  (*maloúhlová difrakce*, SAXS), tj. úhlů které svírají směr rozptýleného záření se směrem primárního paprsku [109].

**Z difrakce v širokoúhlé oblasti (WAXS)** lze získat tyto informace:

- stupeň krystalinity, který je stanoven z integrální intenzity rozptylu záření na krystalické ( $I_k$ ) a amorfní složce ( $I_a$ ), resp. z plochy pásů charakteristických pro krystalickou a amorfní fázi dle rovnice (3.7):

$$\chi_c = \frac{I_k}{I_k + I_a} \quad (3.7)$$

Hodnota stupně krystalinity zjištěná z intenzit krystalických a amorfních reflexí dle rovnice (3.7) je ve skutečnosti menší, než skutečný obsah krystalické fáze ve vzorku, neboť krystalické reflexe ztrácejí část své intenzity následkem teplotních kmitů atomů a mřížkových poruch. Tato intenzita se objevuje v amorfním difúzním rozptylu. Proto bývá ve vztahu (3.7) zaváděn korekční faktor závislý na faktoru neuspořádanosti [109].

Pokud je znám kvantitativně tvar amorfního rozptylu daného polymeru (*změřený např. u zcela amorfního vzorku nebo taveniny vzorku a místa, kde se nevyskytují krystalické reflexy*), lze snadno určit procento krystalické fáze srovnáním ploch amorfní a krystalické složky na difraktogramu. U polymerů s nižší krystalinitou jsou difrakční píky rozšířené a amorfní halo je intenzivnější, viz obr. 3.13e [108].

- střední velikost krystalitů z šířky reflexních stop pomocí Scherrerovy rovnice (3.8)

$$L_{hkl} = \bar{N} \cdot d_{hkl} = \frac{K^* \cdot \lambda}{\beta_o \cdot \cos \theta} \quad (3.8)$$

kde značí:  $L_{hkl}$  střední velikost krystalitů ve směru kolmém k rovinám hkl [nm],  $\bar{N}$  střední počet mezirovinových vzdáleností  $d_{hkl}$  [1],  $\lambda$  vlnovou délku paprsku [nm],  $\beta_o$  integrální šířku

reflexe [°] při úhlu dopadu  $\theta$  [°] a  $K$  konstantu blízké jedné, jejíž hodnota je ovlivněna tvarem krystalitů a experimentálními podmínkami [109, 112].

Stanovení velikosti krystalitů z šířky reflexních stop je komplikováno skutečností, že k rozšíření reflexů přispívají rovněž nepravidelnosti v mřížkové struktuře, způsobené defekty v mřížce nebo vnitřním napětím [81].

- poruchy mřížky (mikronapětí, parakrystalické poruchy) zjištěné zvýšením velikosti rozšíření reflexe, která se zvětšuje s rostoucím řádem reflexe.
- stupeň orientace polymeru z rozdělení intenzity reflexů v referenčním směru „z“ pomocí Hermanova orientačního faktoru vyjádřeného rovnicí (3.9), charakterizovaným úhlem od referenčního směru, při kterém intenzita reflexního srpku klesla na polovinu nejvyšší hodnoty:

$$f_{\phi} = \frac{1}{2} \cdot (3 \langle \cos^2 \phi \rangle - 1) \quad (3.9)$$

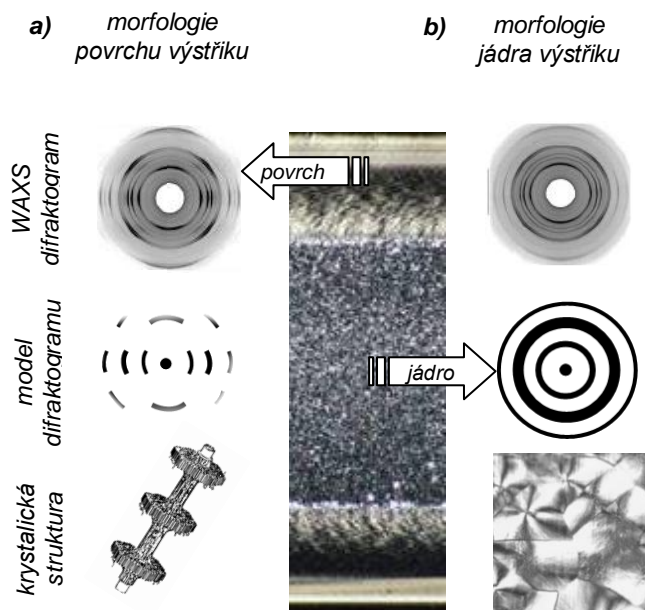
kde značí:  $\langle \cos^2 \phi \rangle$  střední čtverec kosinu úhlu, který svírají řetězce nebo jejich segmenty s referenčním směrem „z“, který je stanoven experimentálně pomocí azimutálního rozdělení intenzity reflexe  $I_{hkl}(\phi)$  dle rovnice (3.10):

$$\langle \cos^2 \phi_{hkl,z} \rangle = \frac{\int_0^{\pi/2} I_{hkl}(\phi) \sin \phi \cdot \cos^2 \phi \, d\phi}{\int_0^{\pi/2} I_{hkl}(\phi) \sin \phi \, d\phi} \quad (3.10)$$

Pro přímé stanovení stupně orientace řetězců makromolekul vzhledem k referenčnímu směru je třeba, aby reflexe  $hkl$  byla meridiální. Z rovnice (3.9) plyne, že pro směr orientace rovnoběžný s referenčním směrem je  $f_{\phi} = 1$ , pro směr kolmý je  $f_{\phi} = -0,5$  a pro náhodné uspořádání (*případ neorientovaného polymeru*) je  $f_{\phi} = 0$  (*při nulové smykové rychlosti*) [109, 113]. Nejvyšší hodnotu orientačního faktoru tak budou polymerní výstřiky dosahovat v povrchové vrstvě mikrostruktury a naopak ve středové vrstvě bude tato hodnota nejnižší. Na difraktogramu se orientovaná textura projeví srpkovitým tvarem reflexí (*viz obr. 3.14*), přičemž tyto tvary jsou tím užší, čím je orientace vyšší. Z difraktogramu na obr. 3.14 je jednoznačně zřejmé, že povrchová vrstva výstřiku je tvořena z vysoce orientovaných makromolekul tak, jak bylo popsáno v kapitole 3.1.2.

- uložení atomů v základní krystalické buňce a její rozměry z poloh reflexních stop, resp. reflexního úhlu a Braggovy rovnice u orientovaných krystalitů [81].
- hustotu krystalické fáze z rozměrů základní krystalické jednotky.

- rozlišení polymerních modifikací, jejich identifikace a kvantitativní určení, např. u polypropylenů fázi  $\alpha$  a  $\beta$ , viz [108].



**Obr. 3.14** Mikrostruktura výstřiku semikrystalického polymeru

- a) struktura povrchové vrstvy výstřiku  
 b) struktura středové vrstvy (jádra) výstřiku

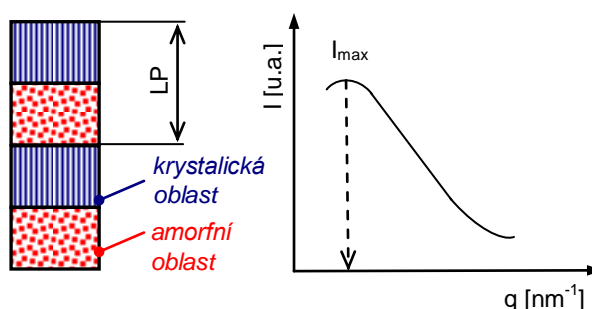
Z **difrakce v malouhlové oblasti (SAXS)**, kde rozptyl záření je způsoben celou částicí bez ohledu na její strukturu (*amorfní nebo krystalickou*), lze získat informace o rozměrech krystalických lamel a vzdálenostech krystalitů stanovením tzv. střední hodnoty dlouhé periody (viz obr. 3.15) z Braggovy rovnice (3.11), která představuje periodické střídání amorfních a krystalických oblastí [114] a bývá stanovována z polohy maxima (*malouhlové rozptylové křivky semikrystalických polymerů vykazují obvykle jedno, někdy však i více maxim, jež jsou důsledkem nadmolekulární periodické struktury*):

$$LP = \frac{2\pi}{q'} \quad (3.11)$$

kde značí:  $LP$  dlouhou periodu [nm] a  $q'$  polohu maxima reflexí [ $\text{nm}^{-1}$ ].

Při znalosti dlouhé periody a krystalinity lze vynásobením těchto hodnot odhadnout tloušťku krystalitů.





Obr. 3.15 Princip stanovení dlouhé periody [112]

### 3.3.2 Polarizační mikroskopie

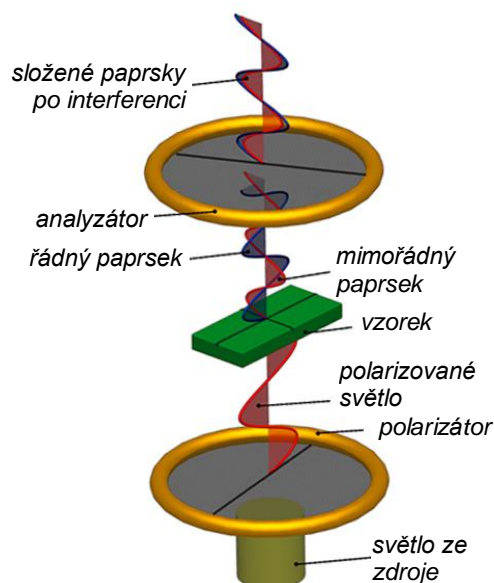
Světelná, polarizační mikroskopie patří společně s transmisí a rastrovací elektronovou mikroskopií k metodám umožňující přímé zobrazení a analýzu morfologie polymeru [115, 116]. Polarizační mikroskopie (*usměřující světelné kmity do jedné roviny*) je užívána ke studiu semikrystalických polymerů, a to nejen k jejich topografii, tedy ke zkontrastnění pro hodnocení typu sférolitické struktury, počtu a velikosti sférolitů [117], ale i k fyzikálním měřením (*tloušťky a orientaci krystalitů [72], dvojlomu imerzní nebo kompenzační metodou, viz [77]*) a ke studiu kinetiky krystalizace (*v případě opatření mikroskopu výhřevným stolek*), tj. pro sledování časového průběhu vzniku a růstu sférolitů [81, 83, 115]. Rozdílnost tlouštěk krystalitů a jejich orientaci je možné ve sledovaném obrazu pozorovat jeho barvou a jasnem. Dokladem vlivu orientace je například vznik maltézského kříže v obraze sférolitů, který je útvarem radiálně uložených krystalitů a zhasnutí světla nastává v místech, kde jsou krystality rovnoběžné se směry kmitu polaroidů, zatímco nejsvětlejší obraz poskytují krystality v diagonálních rovinách [72].

Pozorování na polarizačním mikroskopu se provádí v procházejícím světle a podle toho je třeba také připravit vzorek v podobě tenké fólie nebo tenkého řezu (*zejména u opacitních polymerů*), nejlépe o tloušťce do 10  $\mu\text{m}$  (*podle propustnosti světla*), uložený v kapce imerzního oleje na podložním sklíčku a pod krycím sklem. Imerzní olej (*např. parafinový*) musí být inertní vzhledem k pozorovanému materiálu. Kapka imerzního oleje (*jednolomná látka*) mezi polarizátorem (*pod nebo v kondenzoru mikroskopu*) a vzorkem zůstává při zkřížených filtrech (*analyzátoru a polarizátoru*) tmavá, zatímco dvojlomné látky (*krystality*) mění rovinu kmitu procházejícího světla a při zkřížených filtrech jsou zobrazeny světle na temném pozadí (*případně barevně, při použití bílého světla vlivem interference*), neboť analyzátor (*v tubusu, pod nebo nad okulárem*) propustí pouze ten paprsek, který kmitá k jeho rovině rovnoběžně, zatímco paprsek kmitající kolmo k rovině analyzátoru dál neprojde. Oba tyto paprsky (*řádný a mimořádný*), které vznikly po průchodu dvojlom-

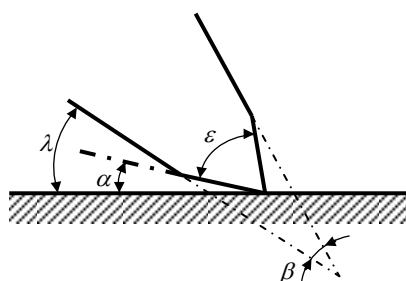
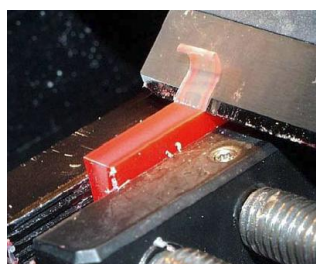


ným objektem rozložením polarizovaného paprsku vycházejícího z polarizátoru, jsou k sobě kolmé (viz obr. 3.16). Pro zvýšení dostatečné odrazivosti studovaného povrchu vzorku lze tento pokovat hliníkem [83].

Z praktických poznatků a odborných studií je zřejmé, že příprava tenkých řezů je pro interpretaci výsledného obrazu velmi důležitá a je třeba znát detailně celý preparační postup, aby bylo možné vysvětlit případné preparační artefakty. Tenký řez je připraven pomocí mikrotomového nože na mikrotomu, přičemž kvalitu řezu a výsledného obrazu studované struktury polymeru ovlivňuje náklon nože upevněný v držáku mikrotomu, resp. nastavený úhel hřbetu mezi řeznou facetou nože a vzorkem (viz obr. 3.17), dále ostří nože a jeho rychlost i rovnoměrnost pohybu při řezání vzorku. Správný náklon ( $\alpha \approx 5^\circ$ ), ostří a pohyb nože zamezí nepravidelnostem řezu, rýhám, deformaci a nerovnoměrné tloušťce řezu (viz obr. 3.18) [78, 118]. Vlastnosti polymerních vzorků jsou do určité míry závislé na způsobu jejich mechanického odběru, neboť část mechanické energie se přemění v energii tepelnou a v lokálních místech odběru tak může dojít v důsledku sekundárních faktorů ke změně morfologie. Odborné studie však prokázaly, že použití mikrotomů, resp. různé řezné rychlosti mikrotomového nože neovlivňují stupeň krystalinity polymeru (*maximálně v desetinách procent*) ani orientaci makromolekul vyjádřenou Hermansovým orientačním faktorem (viz rovnice 3.9), jejichž změna by ovlivnila jak morfologii, tak i vlastnosti polymeru [119].

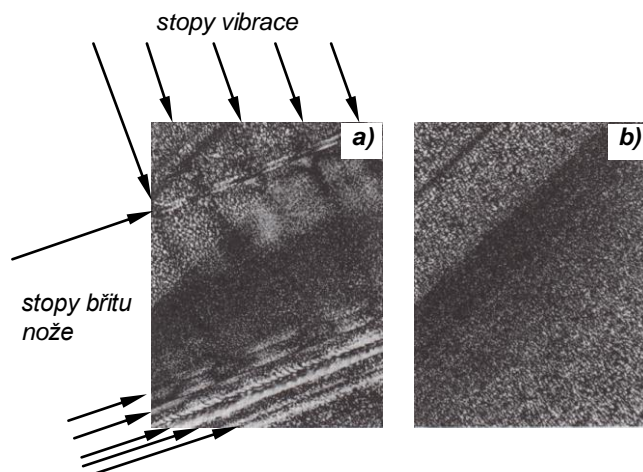


**Obr. 3.16** Princip polarizačního mikroskopu [59]



**Obr. 3.17** Geometrie mikrotomového nože [78, 118]

$\alpha$ - úhel hřbetu,  $\beta$ - úhel břitu,  $\lambda$ - úhel sklonu,  $\varepsilon$ - fazetový úhel

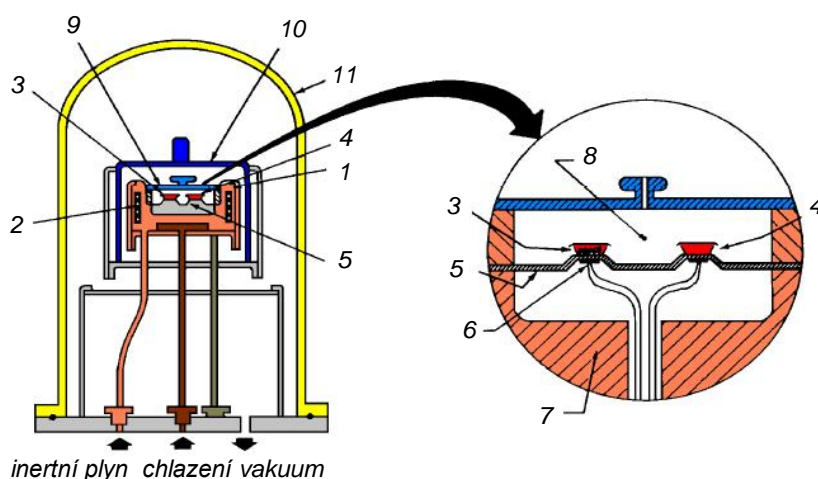


**Obr. 3.18** Mikrotomový řez polypropylenů [78]

a) špatná kvalita řezu, b) dobrá kvalita řezu

### 3.3.3 Diferenční snímací kalorimetrie

Metoda diferenční snímací kalorimetrie (DSC) je nejpoužívanější metodou termických analýz pro charakterizaci polymerů (určením přechodových teplot a teploty krystalizace) i studium jejich nadmolekulární struktury, resp. stupně krystalinity (z entalpických přeměn v oblasti tání studovaných polymerů), při níž jsou jako funkce teploty nebo času zaznamenávány tepelné efekty spojené s fyzikálními a chemickými ději ve vzorku. Aplikční možnosti metody DSC jsou ovšem mnohem rozsáhlejší [120], avšak tyto již nesouvisí s cíli disertační práce.



**Obr. 3.19** Schéma a princip zařízení DSC

1- topný blok, 2- ohřev, 3- pánvička pro testovaný vzorek, 4- referenční pánvička (standard), 5- termoelektrický disk, 6- chromová ploténka (platforma), 7- připojení termočlánků, 8- vstup pro inertní plyn, 9- kryt měřící cely, 10- kryt topného bloku, 11- kryt

Vzorek polymeru zalisovaný v hliníkové pánvičce a uložený do měřicí cely zařízení (viz obr. 3.19) je společně se zvoleným teplotně inertním standardem (v případě polymerů vzduchem, resp. prázdnou hliníkovou pánvičkou) ohříván nebo chlazen konstantní rychlostí a pomocí tzv. diferenčního termočlánku je porovnávána jeho okamžitá teplota se standardem. V průběhu měření je automaticky regulován tepelný příkon dodávaný do vzorku v závislosti na teplotní změně specifické tepelné kapacity materiálu tak, aby byla zajištěna konstantní rychlost ohřevu, resp. chlazení, a aby teplotní rozdíl mezi měřicími místy vzorku a standardu byl nulový. V průběhu měření dochází k řadě entalpických změn, které jsou zapříčiněny fyzikálními a chemickými ději při ohřevu vzorku, resp. při jeho následném chlazení. Entalpické změny, které mohou být endotermního (např. při tání krystalitů polymeru) nebo exotermního charakteru (např. při krystalizaci polymeru), vypovídají významně o povaze zkoumaného materiálu a po integraci je možné je kvantifikovat. Výsledkem měření DSC je závislost difference tepelných příkonů mezi měřicími místy (potřebné pro udržení izotermních podmínek) nebo měrné tepelné kapacity na teplotě (viz obr. 3.20), popř. času (tzv. DSC termogram) [121, 122].



Obr. 3.20 DSC termogram pro PET

Z termogramu je možné stanovit jednotlivé přechodové teploty skelného přechodu a tání polymeru, teplotu krystalizace, stupeň krystalinity (na základě entalpie tání), ale také jiné nerovnovážné děje, např. dokrystalizaci materiálu (sekundární, studenou krystalizaci) v důsledku rychlého chlazení polymeru během jeho zpracování.

Teplota tání ( $T_m$ ) vyjádřená rovnicí (3.12) je závislá na molekulární struktuře (*tj. na chemickém složení, molekulové hmotnosti, obsahu nekystalizujícího komonomeru, apod.*) a morfologii polymeru, především na velikosti krystalitu, ale také defektech krystalové mřížky. Malé krystality mají značný poměr povrchu k objemu a tak se uplatňuje příspěvek povrchové volné energie, který se přičítá k volné energii krystalu a tím se snižuje volná energie tání a také teplota tání. Pro tuto záležitost byla odvozena rovnice (3.13):

$$T_m = \frac{\Delta H_m}{\Delta S_m} \quad (3.12)$$

$$T_m = T_m^o \cdot \left( 1 - \frac{2\sigma_e \cdot V_m}{L_{kr} \cdot 10^{-9} \cdot \Delta H_m} \right) \quad (3.13)$$

kde značí:  $\Delta H_m$  změnu entalpie tání [J],  $\Delta S_m$  změnu entropie tání [ $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  $T_m^o$  rovnovážnou teplotu tání u nekonečně velkého ideálního krystalu [K],  $\sigma_e$  povrchovou energii [ $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$ ],  $V_m$  molární objem monomerní jednotky [ $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ] a  $L_{kr}$  tloušťku krystalitu [nm].

Rovnice (3.12) vychází z rovnice (3.1), neboť při teplotě tání platí podmínka rovnováhy mezi krystalem a taveninou, tzn. změna Gibbsovy volné energie  $\Delta G = 0$ . Při prvním přiblížení je zřejmé, že entalpie tání na molekulárních parametrech polymeru nezávisí, avšak entropie je na ně značně citlivá, a to je příčinou, proč na těchto parametrech závisí i teplota tání [121].

Krystalický podíl polymeru se obvykle skládá z mnoha krystalitů, které se od sebe liší velikostí, dokonalostí i teplotou tání, proto je endoterm tání polymeru rozložen v určitém teplotním intervalu. Z velikosti a tvaru endotermu, je-li známo teplo tání dokonale krystalického polymeru (*určené např. extrapolací hodnot tepla tání strukturně obdobných nízkomolekulárních krystalů - pro polypropylen izotaktický:  $209 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$  a syndiotaktický polypropylen:  $-196 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$* ), lze po stanovení entalpie tání vzorku integrací teplotní závislosti tepelné kapacity dle rovnice (3.14) vyhodnotit stupeň krystalinity, viz rovnice (3.15) [105, 123]:

$$\Delta H_m = 10^{-3} \int_{T_0}^{T_i} \Delta c_p dT \quad (3.14)$$

$$\chi_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_{m,100}} \cdot 100 \quad (3.15)$$

kde značí:  $\Delta c_p$  změnu měrné tepelné kapacity při konstantním tlaku [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  $T$  termodynamickou teplotu [K],  $\chi_c$  stupeň krystalinity [%],  $\Delta H_m$  změnu entalpie tání vzorku [ $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ ] a  $\Delta H_{m,100}$  změnu entalpie tání dokonale krystalického polymeru [ $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ ].



Z praktických zkušeností a z odborných studií [121, 124] je nutné upozornit na základní faktory, které ovlivňují výsledky analýzy materiálu. Jedná se především o faktory **instrumentálního charakteru** související např. s tepelnými zdroji a teplotním regulačním systémem, systémem měření teploty, záznamem termoanalytických křivek, apod. Dále jde o **faktory metodické**, tedy způsob ohřevu, geometrické a celkové řešení přístroje pro základní podmínky přestupu tepla, vliv atmosféry, způsob umístění a přípravy vzorku (*jeho velikost, předběžnou úpravu, homogenitu, apod.*) a v neposlední řadě o **faktory související s vlastnostmi polymerů a inertního vzorku** [121].

## 4 POPIS EXPERIMENTÁLNÍHO VÝZKUMU DISERTAČNÍ PRÁCE

Výzkum nekonvenčních metod temperace vstřikovacích forem na proces chlazení, vlastnosti a morfologii tenkostěnných polypropylenových výstřiků je řešen pro případy temperace, u nichž lze na základě jejich fyzikálního principu nebo tepelných vlastností očekávat zvýšený odvod tepla z výstřiku, který by přispěl k zvýšení hospodárnosti výroby nebo pro případy, u nichž nelze z konstrukčního hlediska formy použít konvenčního temperačního systému s cirkulující vodou.

S ohledem na stanovené cíle disertační práce a rešeršní poznatky uvedené v předchozích kapitolách, shrnující význam a vliv tepelných procesů ve vstřikovací formě na kvalitu výstřiku a jeho morfologickou strukturu, je experimentální výzkum koncipován do tří částí. V první části je výzkum zaměřen na rozložení teplotního pole v oblasti jedné (*monitorované*) tvarové vložky vstřikovací formy zhotovené z nízkolegované mangan-chromové oceli nebo slitiny mědi, temperované samostatně cirkulující vodou (*konvečním způsobem nebo systémem tzv. konformního chlazení*), vzduchem, či ve vzájemné kombinaci s tepelnou trubicí. K výzkumu nekonvenčních metod temperace tvarových částí vstřikovacích forem je tímto způsobem použito vysoce tepelně vodivého materiálu na bázi slitiny mědi, konformního systému chlazení (*umožňující zhodnotit vliv geometrického faktoru temperačních kanálů*), tepelné trubice (*založené na fázové přeměně teplosměnného média*) a Ranque-Hilsch vírové trubice, pracující se stlačeným vzduchem.

V druhé části experimentálního měření je na základě rentgenografie, velikosti fázových přeměn polypropylenových vzorků v oblasti tání krystalitů a jejich strukturní analýzy v polarizovaném světle cílem zhodnotit morfologii výstřiků, resp. stupeň krystalinity a heterogenitu jejich struktury (*tzv. „skin-core“ efekt*), která je na základě teoretických poznatků závislá na rychlosti chlazení (*viz kap. 3*) a významným způsobem ovlivňuje konečné vlastnosti výstřiků.

V poslední třetí části experimentálního měření jsou zhodnoceny základní mechanické vlastnosti výstřiků v závislosti na podmínkách chlazení, resp. temperace vstřikovací formy a morfologie výstřiku.

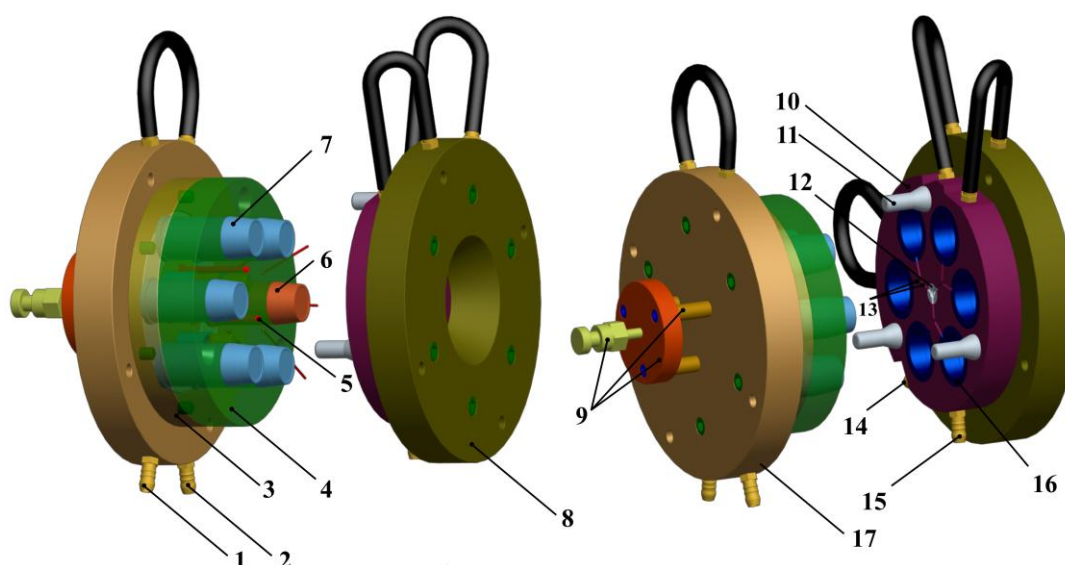
### 4.1 Podmínky realizace experimentů

Pro experimentální výzkum bylo použito vstřikovací formy, jejíž konstrukční řešení je specifikováno v kap. 4.1.1. Konstrukce formy umožňovala snadnou výměnu materiálu tvarové vložky i implementaci jednotlivých temperačních prostředků způsobem uvedeným v kap. 4.1.2. Měření teplotních polí v nástroji a zhotovení výstřiků (*o tloušťce stěny*

0,8 mm, resp. 1,3 mm v oblasti dna) v závislosti na podmínkách teploty bylo provedeno na šnekovém bezsloupkovém a plně hydraulickém vstřikovacím lisu Engel Victory 80/25 s komfortním mikroprocesorovým řízením CC200.

#### 4.1.1 Konstrukce vstřikovací formy

K experimentálnímu výzkumu byla použita šestinásobná, dvoudesková vstřikovací forma s jednou dělicí rovinou (viz obr. 4.1 a příloha 1). Plnění tvarových dutin je konstrukčně řešeno tunelovým vtokem, standardní teploty tvarových částí formy prostřednictvím společného temperačního agregátu s cirkulujícím teplosnosným médiem (vodou) uvnitř temperačních kanálů a vyhození výstřiků pomocí stírací desky v pohyblivé části formy.



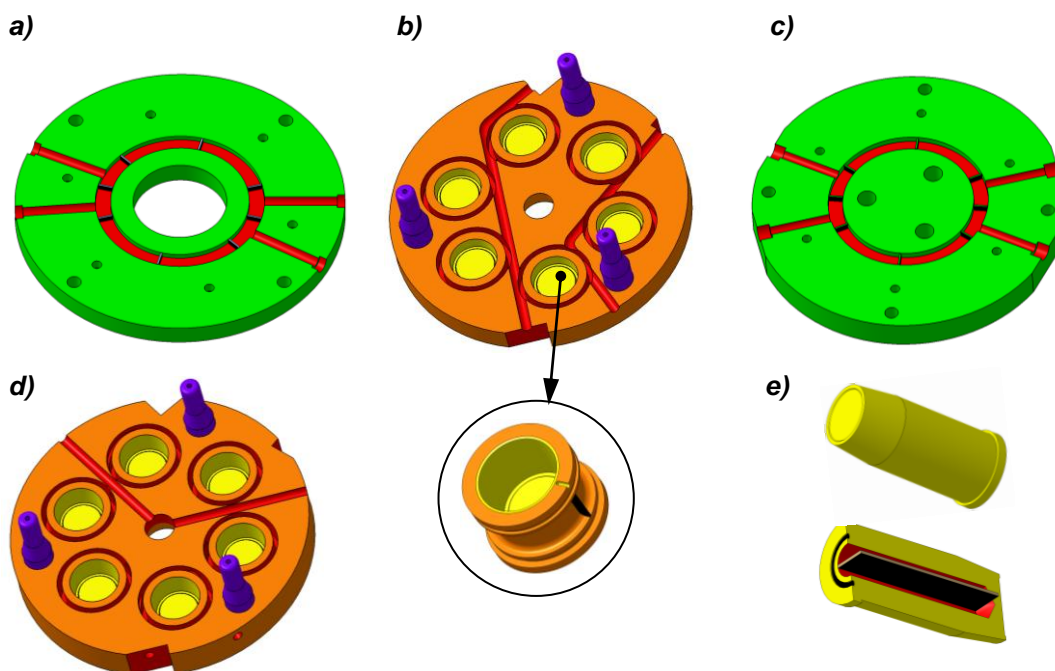
**Obr. 4.1** Konstrukce vstřikovací formy

1- přívod temperačního média do upínací desky pohyblivé části formy, 2- odvod temperačního média z pohyblivé části formy, 3- kotevní deska tvarových vložek (tvárníků), 4- stírací deska, 5- předržovač vtoku, 6- monitorovaná tvarová vložka (tvárník), 7- ocelové vložky tvárníků, 8- upínací deska pevné části formy, 9- komponenty vyhazovacího systému, 10- kotevní deska tvárníc, 11- vodící kolíky, 12- vtoková vložka, 13- rozváděcí kanály, 14- přívod temperačního média do pevné části formy, 15- odvod temperačního média z pevné části formy, 16- tvarová vložka tvárnice, 17- upínací deska pohyblivé části formy

Temperační systém formy má tři okruhy pro teplotu tvarových dutin (viz obr. 4.2): v upínací desce pevné části formy (okruh 1), v kotevní desce pevné části formy (okruh 2a) a v upínací desce pohyblivé části formy (okruh 3). Samostatně je řešen okruh pro teplotu vtokové vložky v kotevní desce pevné části formy (okruh 2b). Funkce jednotlivých temperačních okruhů je následující:



- **okruh 1** přivádí teplotonosné médium do oblasti dna výstřiku, tedy na spodní část tvarové dutiny, tj. tvárnice,
- **okruh 2a** temperuje tvarové části formy obtékáním teplotonosného média okolo tvarových vložek tvárnice,
- **okruh 3** přivádí teplotonosné médium na spodní část tvarových vložek - tvárníků, které je posléze dopravováno k jejich vrcholu systémem vrtaného kanálu a ploché přepážky,
- **okruh 2b** je určen výhradně k temperaci vtokové vložky.



**Obr. 4.2** Temperační okruhy vstřikovací formy

a) okruh 1: temperace spodních částí tvárnice v upínací desce pevné části formy,  
b) okruh 2a: temperace stěn tvárnice, c) okruh 3: hlavní temperační kanál v upínací desce pohyblivé části formy pro temperaci tvarových vložek (tvárníků) přepážkovým systémem,  
d) okruh 2b: temperace vtokové vložky, e) temperace tvarové vložky přepážkovým systémem (vedlejší temperační kanál s plochou přepážkou)

Před použitím vstřikovací formy byla provedena renovace všech funkčních částí formy a s ohledem na nebezpečí snížení součinitele přestupu tepla mezi teplotonosným médiem a stěnou formy [50] byla v důsledku možné koroze temperačních kanálů provedena jejich údržba a obnovena těsnost. V konečné fázi byla po upnutí formy na stroj, připojení temperačního agregátu, seřízení zdvihu, přítlaku vyhazovačů i trysky, vyzkoušena funkčnost jednotlivých systémů na prázdko a ověřeno, zda nevykazují funkční závady. K ochraně a dotěsnění kapilárních netěsností temperačního systému a pro zvýšení jeho tepelné účinnosti bylo použito přípravku obsahující prostředek pro dispergaci anorganických i organických usazenin a inhibitor zabraňující vnitřní korozi i tvorbě vodního kamene



na stěnách kanálů (v důsledku minerálních látek ve vodě, zejména Ca a Mg), který je inertní vůči těsnění, hadicím a dalším součástem temperačního systému. Po provedených úpravách následovaly technologické zkoušky formy: nastavení provozních parametrů vstřikovacího stroje i formy, vstřikování do formy a úprava technologických parametrů k dosažení vzhledově i rozměrově vyhovujících výstřiků (vstřikovacího tlaku, teploty taveniny, rychlosti vstřikování, apod.).

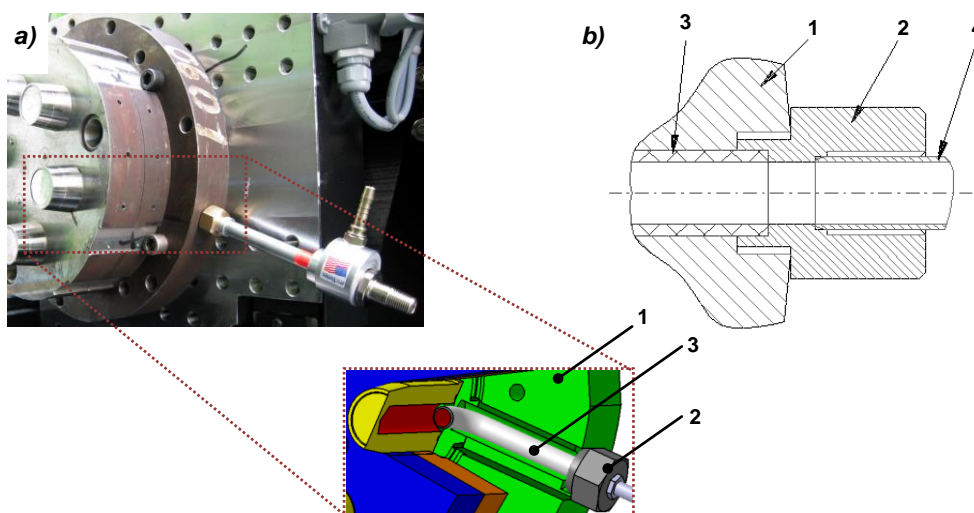
#### 4.1.2 Koncepce temperačních systémů v oblasti monitorované tvarové vložky

V základním stávajícím (standardním) provedení byla temperace pohyblivé a pevné části formy zajištěna cirkulující vodou v temperačních kanálech pomocí temperačního agregátu TA 3 s chladicím okruhem, topným tělesem o výkonu 3 kW, cirkulačním čerpadlem s dostatečným výkonem  $60 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  a řadou zabezpečujících prvků, umožňujících bezporuchový provoz (termočlánkem, regulací topení s PID řízením, magnetickým ventilem napouštění, apod.). Temperace tvarových vložek v pohyblivé části vstřikovací formy (viz obr. 4.2e, konstrukce tvarové vložky viz příloha 2) je řešena přepážkovým systémem. Toto řešení představuje temperační kanál kruhového průřezu v ose tvarové vložky (vedlejší temperační kanál vrtaný kolmo na hlavní rozváděcí kanál) s přepážkou (plochý hranol umístěný v ose kanálu), která jej rozdělí na dva půlkruhové kanály, přičemž po jedné straně přepážky proudí teplonosné médium z hlavního rozváděcího kanálu (viz obr. 4.2c) do dutiny tvarové vložky, obtéká vrchol přepážky a po opačné straně se vrací zpět do hlavního temperačního kanálu. Popsaná koncepce temperačních kanálů tvarových vložek a konstrukce vstřikovací formy umožnila následnou implementaci vírové i tepelné trubice do jedné monitorované tvarové vložky a v případě použití konformního chlazení nebo vysoce tepelně vodivého materiálu na bázi slitiny mědi také její výměnu. Temperace pevné části formy byla ve všech uvedených případech řešena i nadále konvenčním způsobem popsaným v kap. 4.1.1, tedy vodou cirkulující v temperačních kanálech.

##### 4.1.2.1 Aplikace Ranque-Hilsch vírové trubice

Pro temperaci jedné ze šesti tvarových vložek v pohyblivé části formy vírovou trubicí byla provedena úprava temperačního systému tak, že v upínací desce pohyblivé části formy byl vyvrtán otvor, k němuž byl pomocí zhotovené přechodky připojen konec vírové trubice s horkým výfukem, který byl spojen s vedlejším vrtaným temperačním kanálem uvnitř tvarové vložky tvárníku pomocí vysokotlaké hadice s ocelovým opletem a vnitřní polytetrafluórethylenovou vrstvou, vyznačující se vysokým teplotním rozsahem, odolností vůči stlačenému vzduchu (temperačnímu médiu), tlaku a ohebností, zabraňující nadměr-

nému zmenšení průřezu v místě ohybu (viz obr. 4.3). V důsledku správné funkce vírové trubice byly z hlavního temperačního kanálu v upínací desce pohyblivé části formy odstraněny dělicí přepážky (viz obr. 4.2c), které sloužily k vedení vody skrz jednotlivá jádra. Touto úpravou bylo zabráněno odporu proti unikajícímu vzduchu z prostorů temperačních kanálů, neboť pokles tlaku více jak o 0,03 MPa by způsobil ztrátu funkčních vlastností vírové trubice. Temperační okruh pevné části formy zůstal nezměněn a využíval cirkulující vodu v temperačních kanálech. Takovéto řešení temperačního systému formy je vzájemnou kombinací aktivního (vody) a pasivního temperačního prostředku (vírové trubice).



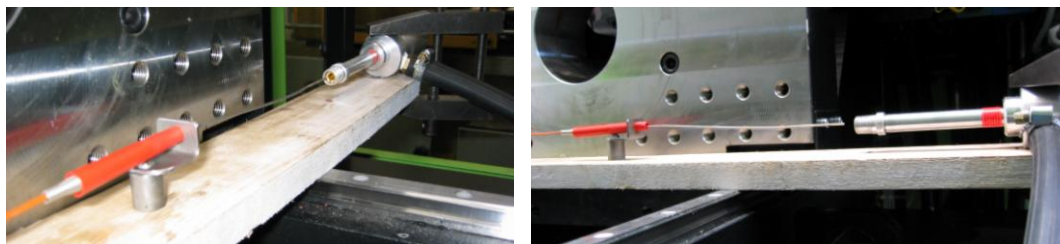
**Obr. 4.3** Koncepce temperačního systému s vírovou trubicí

a) vstřikovací forma, b) schéma montáže vírové trubice k nástroji  
1-upínací deska pohyblivé části formy, 2- přechodka, 3- hadice s opletem, 4- vírová trubice

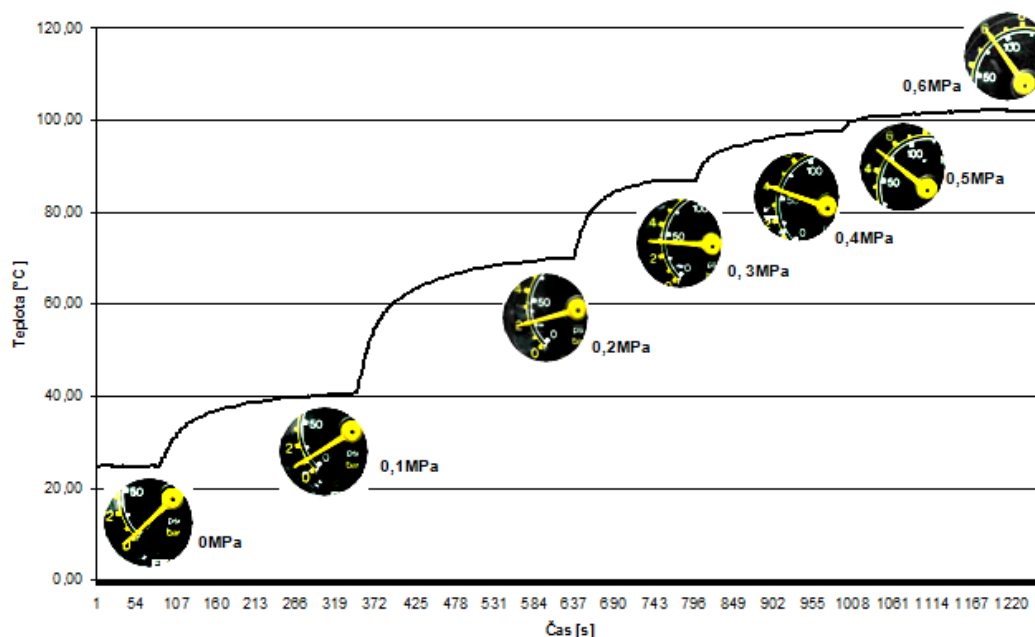
K temperaci tvarové vložky vstřikovací formy vírovou trubicí bylo použito trubice modelového provedení 208-25-H firmy ITW Vortec (v ČR obchodně zastoupené společností s r.o. Lontech Pardubice) připojené k rozvodné síti stlačeného vzduchu pomocí šroubení, která dodává ustálený vstupní tlak 0,6 MPa (běžně používaný v průmyslových rozvodech). Regulace a kontrola dodávaného tlaku byla zajištěna redukčním ventilem s manometrem, který byl předřazen vstupu stlačeného vzduchu do vírové trubice a dutiny tvarové vložky. Rozdíl tlakových ztrát mezi kompresorem (zdrojem) a vírovou trubicí (spotřebičem) byl eliminován vzdušníky tlakového rozvodu. Vlhkost stlačeného vzduchu, která se do kompresoru dostává vzduchem nasávaným z atmosféry byla ze stlačeného vzduchu účinně odstraněna v rozvodné síti zařazenou sušičkou.

Model vírové trubice s označením 208 je zařízení, které pomocí stlačeného vzduchu o tlaku 0,69 MPa vytváří dva vzduchové proudy (viz kap. 2.2.2.3), z nichž jeden lze dle použitého typu generátoru seřadit až na +121 °C (při použití generátoru typu 25H) a druhý

až na  $-48\text{ }^{\circ}\text{C}$  (při použití generátoru typu 11L) [64]. Schéma modelu vírové trubice, spotřeba vzduchu a množství tepla je uvedeno v příloze 3. Pro experimentální měření bylo využito horkého proudu vzduchu, tedy vírové trubice s generátorem typu 25H. Pro přesnou regulaci teploty vzduchu vycházejícího z teplého konce vírové trubice a vstupujícího do dutiny tvarové vložky bylo provedeno proměření jejího chodu naprázdno a to při proměnném tlaku v rozmezí (0 až 0,6) MPa, který je určen otevíráním nebo uzavíráním redukčního ventilu, resp. změnou poměru objemu vystupujícího vzduchu z obou konců vírové trubice, řízeného jehlovým redukčním ventilem na horkém výfuku. Je zřejmé, že pokud více než 50 % vstupujícího vzduchu je propuštěno přes studený výfuk, produkuje vírová trubice maximální účinnost (*největší výstup tepla*) a naopak. Pro měření chodu vírové trubice naprázdno bylo použito jednoduchého přípravku, umožňující upevnění vírové trubice a termočlánku, jehož činný konec byl zafixován od výfuku horkého vzduchu ve stanovené vzdálenosti 5 mm, viz obr. 4.4. Jehlový ventil byl nastaven tak, aby bylo dosaženo maximální teploty na horkém výfuku vírové trubice při tlaku stlačeného vzduchu 0,6 MPa. Naměřené hodnoty teplot na horkém výstupu vzduchu jsou graficky v závislosti na čase a tlaku stlačeného vzduchu znázorněny na obr. 4.5.



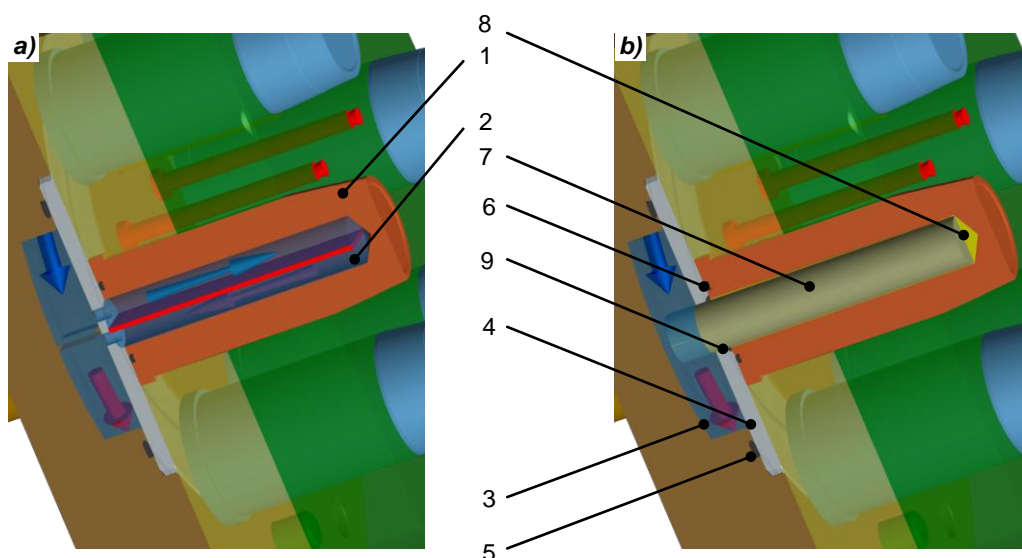
**Obr. 4.4** Měření teplot vírové trubice při chodu na prázdkno



**Obr. 4.5** Závislost teploty vzduchu na vstupním tlaku pro horký výfuk vírové trubice

#### 4.1.2.2 Aplikace tepelné trubice

Koncepce temperačního systému tvarové vložky s tepelnou trubicí vychází z rozměrů vedlejšího temperačního kanálu vrtaného v tvarové vložce (viz příloha 2) a z hlavního temperačního kanálu v upínací desce pohyblivé části formy (viz obr. 4.2c). Pro umístění tepelné trubice v ose tvarové vložky bylo využito vedlejšího temperačního kanálu, přičemž kondenzační část tepelné trubice byla vyvedena do hlavního temperačního kanálu v upínací desce formy s cirkulující vodou (tzv. *smáčený prostor*). Konstrukční provedení temperace tvarové vložky před (temperace pouze aktivním temperačním prostředkem, tj. cirkulující vodou) a po aplikaci tepelné trubice je zřejmé z obr. 4.6.

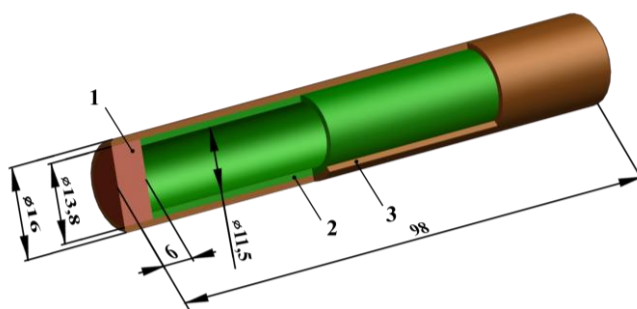


**Obr. 4.6** Konstrukce temperačního systému tvarové vložky vstříkovací formy

a) konvenční temperace vodou: přepážkový systém, b) temperace tepelnou trubicí  
1- tvarová vložka (tvárník), 2- vedlejší temperační kanál rozdělený plochou přepážkou, 3- hlavní temperační kanál v upínací desce, 4- kroužek uzavírající hlavní temperační kanál, 5, 6- těsnění, 7- tepelná trubice, 8- tepelný spoj (po obvodu tepelné trubice), 9- těsnění obvodu tepelné trubice

Pro účely experimentálního výzkumu byla ve spolupráci s firmou THHT Praha, s.r.o. zhotovena kapilární tepelná trubice s pěti vrstvou síťovou kapilární soustavou, měděným obalem a 4 ml ethylalkoholu tak, aby splňovala požadavky odvodu tepla při daných procesních parametrech během procesu vstříkování. Vhodný teplotní rozsah pracovní kapaliny (*teplosměnného média*) odpovídá rozmezí (0 ÷ 130) °C. Dle dosud známých, zdokumentovaných a provedených úprav temperačních systémů [58] je zpravidla standardní temperační kanál s cirkulující vodou ve vztahu k případné aplikaci tepelné trubice asi dvojnásobně rozměrově i tepelně předimenzován. Využitím prostoru konvenčního temperačního systému tvarové vložky pro umístění tepelné trubice lze v řadě případů dosáhnout

intenzivnějšího odvodu tepla z tvarových částí vstřikovací formy. Rozměry tepelné trubice (viz obr. 4.7) vychází z konstrukčních rozměrů stávajícího temperačního systému. Vnější průměr trubice (16 mm) vychází z průměru vedlejšího temperačního kanálu vrtaného v tvarové vložce tvárníku, jež je 16,4 mm. Průměr trubice se volí ca. o (0,1 ÷ 0,4) mm menší, než je průměr kanálu [58]. Délka tepelné trubice (98 mm) byla stanovena rovněž na základě rozměrových možností stávajícího vedlejšího i hlavního temperačního kanálu (tj. temperačního kanálu v tvarové vložce a v upínací desce pohyblivé části formy). Délka kondenzační části tepelné trubice, vyvedené do hlavního temperačního kanálu v upínací desce pohyblivé části formy (smáčená část), vychází z kontrolního výpočtu tepelných poměrů na základě vstupních parametrů experimentu (viz tab. 4.1).



**Obr. 4.7** Konstrukce tepelné trubice

1- víčko, 2- kapilární soustava, 3- měděný plášť

Kontrolní výpočet tepelných poměrů ve formě při aplikaci tepelné trubice, resp. stanovení minimální plochy nebo délky smáčené části tepelné trubice je proveden pro případ ocelové vložky a teplotu formy / temperačního média 60 °C na základě postupu vytvořeného v Molding Factory, Ishizuka Industry Co., Ltd. (viz rovnice 4.1 až 4.8), který je publikován pod odkazem [58]. Při výpočtu minimální délky smáčené části tepelné trubice se uvažuje s tepelnými a fyzikálními vlastnostmi taveniny plastu, materiálu formy, tepelné trubice, dosavadním počtem cyklů za hodinu, popřípadě dobou cyklu a objemem formy tvarové vložky (bez tepelné trubice), vymezuje její tvarovou dutinu. Důležitými parametry, které ovlivňují délku smáčené části tepelné trubice, jsou požadovaná teplota formy a teplota temperačního média, resp. vody, cirkulující v hlavním temperačním kanálu pohyblivé části formy a obtékající kondenzační část tepelné trubice. Vzhledem ke skutečnosti, že v podmínkách experimentálního výzkumu je pevná i pohyblivá část vstřikovací formy temperována jedním temperačním agregátem, je teplota cirkulující vody, která v případě monitorované tvarové vložky tvárníku obtéká také kondenzační část tepelné trubice, nastavena na teplotu 30 °C, resp. 45 °C nebo 60 °C tak, aby podmínky temperace pevné části

formy (*tvárnice*) byly při všech použitých temperačních prostředcích v rámci experimentálního výzkumu shodné.

**Tab. 4.1** Vstupní parametry experimentu [58, 125]

Vlastnost	Značka	Jednotka	Typická hodnota
Měrná tepelná kapacita taveniny polypropylenu	$c_{tav}$	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	2696
Měrná tepelná kapacita materiálu formy	$c_f$	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	460
Hustota materiálu formy	$\rho_f$	$kg \cdot m^{-3}$	7850
Objem tvarové vložky formy ( <i>bez tepelné trubice</i> )	$V_f$	$10^{-5} m^3$	2,46
Hmotnost výstřiku ( <i>materiál viz kap. 4.2</i> )	$m$	$10^{-3} kg$	2,90
Doba vstřikovacího cyklu ( <i>viz kap. 4.1.4</i> )	$t_c$	s	45
Počet cyklů ( <i>za hodinu</i> )	$n_c$	$h^{-1}$	80
Teplota taveniny polypropylenu ( <i>viz kap. 4.1.4</i> )	$T_{tav}$	$^{\circ}C$	250
Teplota povrchu výstřiku po vyjmutí z formy	$T_{vyh}$	$^{\circ}C$	60
Teplota formy	$T_f$	$^{\circ}C$	60
Průměr tepelné trubice	$d_{tt}$	$10^{-3} m$	16
Součinitel přestupu tepla mezi tepelnou trubicí a temperačním médiem ( <i>cirkulující vodou</i> )	$\alpha_{tt}$	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	1745

- Množství uvolněného tepla z taveniny plastu během jednoho cyklu ( $Q_{pl}$ ):

$$Q_{pl} = c_{tav} \cdot m \cdot (T_{tav} - T_{vyh}) \quad (4.1)$$

$$Q_{pl} = 2696 \cdot 2,90 \cdot 10^{-3} \cdot (250 - 60) = 1485,5 J$$

- Korigované množství uvolněného tepla z taveniny plastu během jednoho cyklu ( $KQ_{pl}$ ):

$$KQ_{pl} = \frac{1}{2} \cdot Q_{pl} \quad (4.2)$$

$$KQ_{pl} = \frac{1}{2} \cdot 1485,5 = 742,8 J$$

- Maximální teplota formy ( $T_{f,max}$ ):

$$T_{f,max} = \frac{KQ_p}{c_f \cdot \rho_f \cdot V_f} + T_f \quad (4.3)$$

$$T_{f,max} = \frac{742,8}{460 \cdot 7850 \cdot 2,46 \cdot 10^{-5}} + 60 = 68,4 ^{\circ}C$$

- Střední referenční rozdíl teplot mezi formou a temperačním médiem - vodou ( $\Delta T_c$ ):

$$\Delta T_c = 0,6 \cdot (T_{f,max} + T_f) - T_{tm} \quad (4.4)$$

$$\Delta T_c = 0,6 \cdot (68,4 + 60) - 60 = 17,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Celkové množství tepla odvedené tepelnou trubicí během jednoho cyklu ( $Q_c$ ):

$$Q_c = \alpha_{tt} \cdot \Delta T_c \cdot t_c \cdot S_{tt,v} \quad (4.5)$$

$$Q_c = 1745 \cdot 17 \cdot 45 \cdot S_{tt,v} = 1334925 \cdot S_{tt,v}$$

- Plocha tepelné trubice obtékaná temperačním médiem - vodou ( $S_{tt,v}$ ):

$$KQ_{pl} = Q_c \quad (4.6)$$

$$S_{tt,v} = \frac{KQ_{pl}}{1334925} \quad (4.7)$$

$$S_{tt,v} = \frac{742,8}{1334925} = 556,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

- Minimální délka smáčené části tepelné trubice ( $L_{k,v}$ ):

$$L_{k,v} = \frac{S_{tt,v}}{\pi \cdot d_{tt}} \quad (4.8)$$

$$L_{k,v} = \frac{556,4 \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot 16 \cdot 10^{-3}} = 11,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Kontrolní výpočtem byla pro zachování stejného odvodu tepla jako u přepážkového systému s cirkulující vodou stanovena minimální délka smáčené části trubice 11 mm. Vzhledem ke konstrukční možnostem hlavního temperačního kanálu formy v upínací desce pohyblivé části formy bylo využito délky smáčené části tepelné trubice 12 mm.

Experimentální formule vytvořená v Molding Factory, Ishizuka Industry Co., Ltd. obsahuje určité zjednodušující prvky, avšak na základě výsledků, resp. rozdílů mezi experimentem, simulací a stavem predikovaným tímto výpočtem, publikovaných pod odkazem [58], lze tuto metodu považovat za dostatečně přesnou.

#### 4.1.2.3 Aplikace konformního chlazení

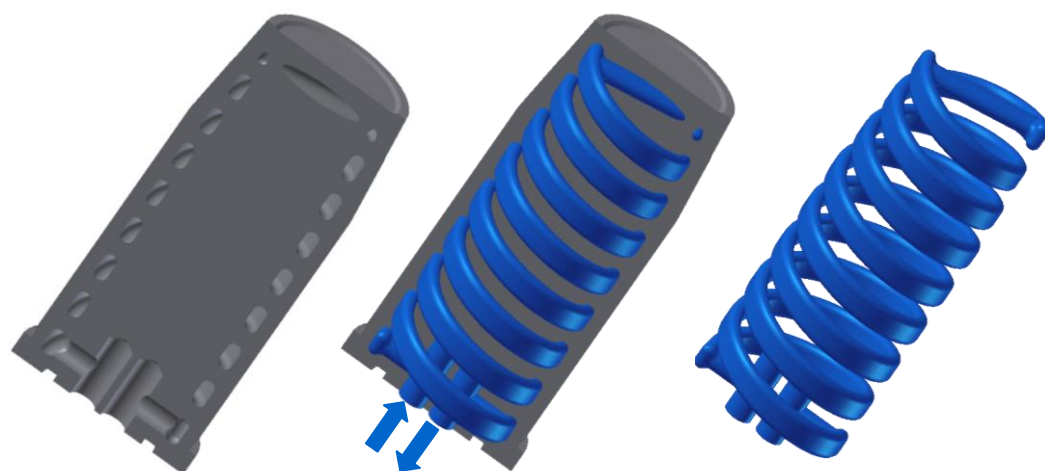
Pro případ koncepce temperačního systému tvarové vložky tvárníku s konformním chlazením byla na základě 3D CAD modelu zhotovena nová tvarová vložka vstřikovací formy technologií laserového spékání kovového prášku po vrstvách „DMLS“ (*Direct Metal Laser Sintering*) ve spolupráci s firmou Innomia, a.s. Jaroměř. K výrobě tvarové vložky bylo použito korozivzdorné oceli ČSN 17 248, vyvinuté pro účely laserového spékání firmou EOS GmbH - Electro Optical Systems (*firemní označení materiálu EOS SS 17-4*),



odpovídající evropské klasifikaci 1.4542 ( $X5CrNiCuNb16-4$ ). Jedná se o precipitačně vyztvrditelnou martenzitickou ocel stabilizovanou niobem s chemickým složením a vlastnostmi uvedenými v tab. 4.2. Tvarová vložka s temperačními kanály ve tvaru dvojité spirály (šroubovice), se čtyřmi závity, stoupáním 20 mm, oválného průřezu o výšce 6 mm a poloměrech 1,5 mm, které kopírují její obrys (viz obr. 4.8 a příloha 4), byla zhotovena spékáním ocelového prášku po jednotlivých vrstvách o tloušťce 20  $\mu\text{m}$  s rychlostí stavby 2  $\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (bez zbytkové porozity) na automatickém zařízení EOSINT M270 s Ytterbium vláknovým laserem a ochrannou atmosférou dusíku. Nastavená tloušťka vrstvy umožnila dodržet tvarovou toleranci vložky v rozmezí  $\pm 0,1$  mm. Vzdálenost povrchu kanálů od vnější stěny tvarové vložky je 3 mm.

**Tab. 4.2** Typické vlastnosti a chemické složení oceli EOS SS 17-4 [126, 127]

Vlastnost				Značka	Jednotka	Typická hodnota		
Mez pevnosti v tahu				$R_m$	MPa	1050		
Smluvní mez kluzu				$R_{p0,2}$	MPa	540		
Modul pružnosti v tahu				$E$	MPa	170 000		
Tvrdost dle Vickerse	po spékání			$HV$	-	230		
	po tepelné úpravě					400		
Součinitel tepelné vodivosti				$\lambda$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	12 ÷ 14		
Maximální pracovní teplota				$T_{max}$	°C	550		
Chemické složení [hm. %]								
C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni, Cu	Cr	Nb
max. 0,07	max. 1,0	max. 1,5	max. 0,04	max. 0,015	max. 0,50	3,0÷5,0	15÷17	max. 0,45



**Obr. 4.8** Model tvarové vložky vstříkovací formy s konformním chlazením



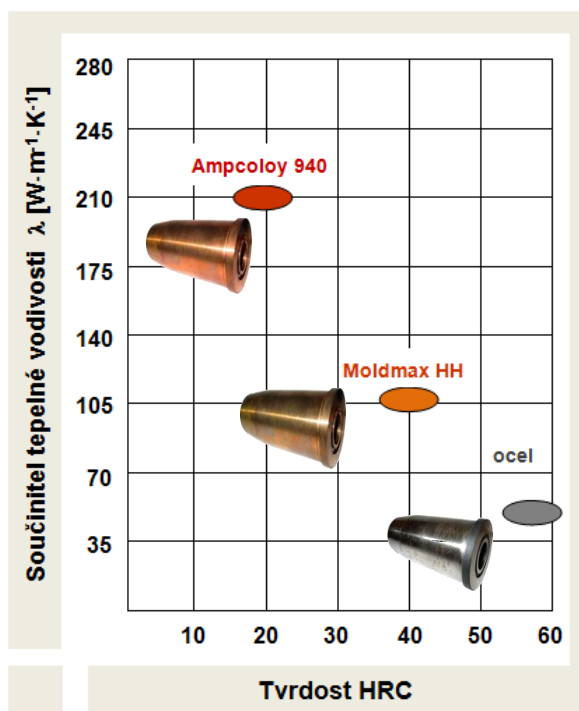
#### 4.1.3 Materiály tvarových vložek tvárníku vstřikovací formy

Materiál tvarových částí formy, resp. jejich tepelná vodivost (*viz obr. 4.9*) je důležitým faktorem ovlivňující tepelné procesy ve vstřikovací formě ve fázi chlazení výstřiku a tím i jeho konečné vlastnosti. Pro ověření intenzifikace chlazení tvarových částí forem aplikací vysoce tepelně vodivých materiálů a především k výzkumu jejich vlivu na strukturu a konečné vlastnosti polypropylenových výstřiků, byl jeden z ocelových tvárnků 16MnCr5 (ČSN 14 220 / 1.7131), resp. monitorovaná tvarová vložka zhotovena také z vysoce legovaných slitin na bázi mědi (*resp. berylia a mědi*), používaných na výrobu tvarových částí forem v průmyslové praxi. Jedná se o slitiny **Moldmax HH** (*vysoce pevná beryliová slitina mědi od firmy Brush Wellman Inc., Mayfield Heights*) a **Ampcoloy 940** (*slitina mědi dodávaná firmou AMPCO METAL S.A., Marly*) s chemickým složením a fyzikálními vlastnostmi uvedenými v tab. 4.3. Výhodami uvedených slitin je nepatrný sklon k adhezi, který umožňuje lehké a rychlé odformování výstřiku ve srovnání s nástrojovou ocelí a skutečnost, že jejich tepelná vodivost při vyšších teplotách, které jsou v praxi běžné, stoupá [128].

**Tab. 4.3** Typické vlastnosti a chemické složení materiálu tvarových vložek formy [125, 128, 129]

Vlastnost				Značka	Jednotka	Typická hodnota				
						Ocel 16MnCr5	Moldmax HH	Ampcoloy 940		
Hustota				$\rho$	$kg \cdot m^{-3}$	7 850	8 350	8 710		
Mez pevnosti v tahu				$R_m$	$MPa$	$\geq 785$	1 280	669		
Modul pružnosti v tahu				$E$	$MPa$	210 000	131 100	131 100		
Tvrdost dle Rockwella				$HRC$	-	63	40	20		
Součinitel tepelné vodivosti				$\lambda$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	42 ÷ 45	110	208		
Měrná tepelná kapacita				$c_p$	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	460	380	380		
Chemické složení materiálu tvarových vložek [hm. %]										
Ocel 16MnCr5 *				Moldmax HH			Ampcoloy 940			
C	Mn	Cr	Si	Be	Co, Ni	Cu	Ni	Si	Cr	Cu
0,16	1,1	1,0	0,2	1,9	0,25	zbytek	2,5	0,7	0,4	zbytek

Poznámka: \* rozbor chemického složení proveden metodou spektrální analýzy (spektrometr Q4 TASMAN)



Obr. 4.9 Součinitel tepelné vodivosti a tvrdost tvarových vložek

#### 4.1.4 Realizace experimentů a procesní parametry vstřikování

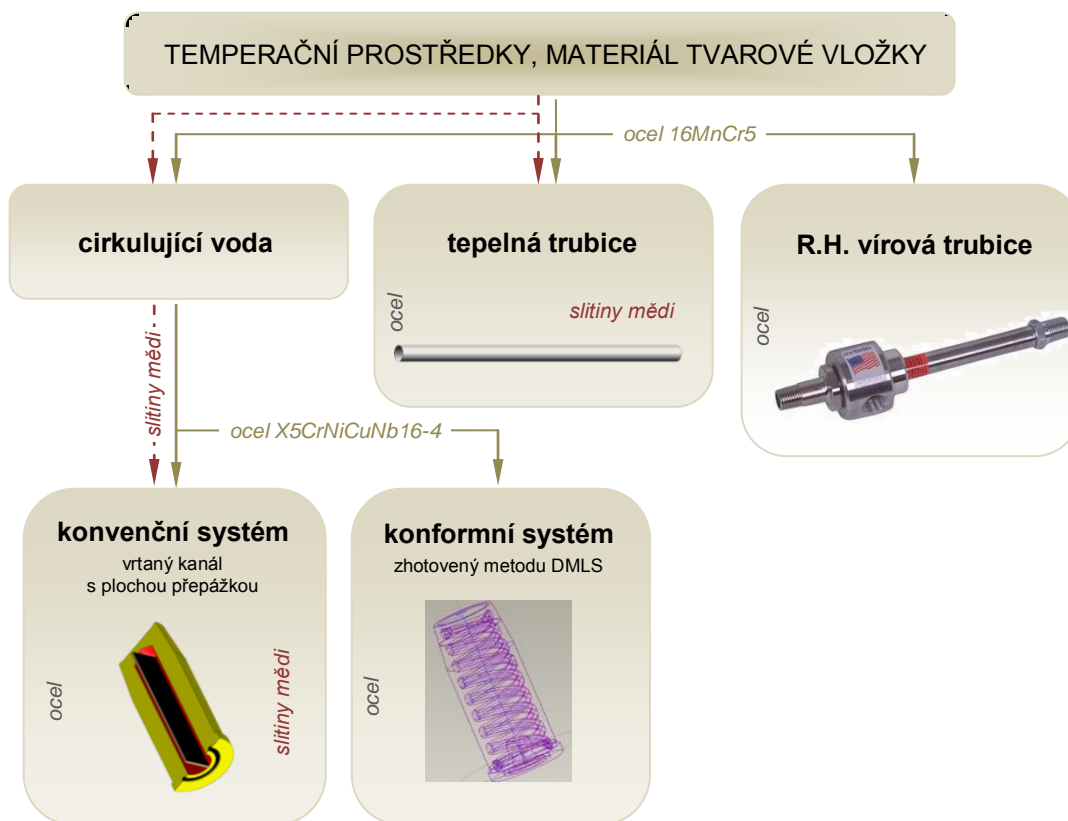
Experimentální výzkum a vstřikování polypropylenových dílů do formy, jejíž teplota byla realizována různými temperačními prostředky, změnou tepelné vodivosti materiálu formy, geometrie a vzdálenosti temperačních kanálů od povrchu tvarové vložky (viz obr. 4.10), byl realizován v několika fázích. Nejprve, pro porovnání výsledků temperace formy konvenčními a nekonvenčními temperačními prostředky, byly vstřikovány díly do formy s ocelovou tvarovou vložkou, resp. ocelovým tvárníkem temperovaným vodou pomocí přepážkového systému (*standardní způsob temperace*, viz kap. 4.1.2). Následně byl ocelový tvárník nahrazen tvárníky ze slitiny mědi Ampcoloy 940 a Moldmax HH. V další etapě výzkumu byla temperace ocelové vložky tvárníku cirkulující vodou v přepážkovém systému nahrazena temperací pomocí stlačeného vzduchu (*tedy Ranque-Hilsch vírovou trubicí*, viz. kap. 4.1.2.1) a tepelnou trubicí (viz kap. 4.1.2.2). V rámci experimentálního výzkumu byla tepelná trubice aplikována k chlazení jak ocelového tvárníku, tak tvárníku zhotoveného z vysoce tepelně vodivého materiálu. Pro tyto účely bylo použito nadále pouze slitiny mědi Ampcoloy 940, která má vyšší hodnotu součinitele tepelné vodivosti než slitina Moldmax HH. V poslední etapě výzkumu byl sledovaný tvárník nahrazen opět ocelovým (z *korozivzdorné oceli X5CrNiCuNb16-4*), avšak s tzv. konformním chlazením, který byl zhotoven metodou laserového spékání ocelového prášku (viz kap. 4.1.2.3)

a umožnil posoudit vliv geometrického faktoru temperačních kanálů na proces chlazení výstřiků.

Ve všech výše uvedených případech temperace tvarové vložky tvárníku byla temperace tvárnice zajištěna vždy cirkulující vodou v temperačních kanálech, tzn. změna temperačního prostředí a materiálu formy byla provedena jen v pohyblivé části formy, tj. v oblasti monitorovaného tvárníku. Experimentální měření a vstřikování polypropylenových dílů bylo realizováno pro sérii teplot temperačního média, resp. formy 30 °C, 45 °C a 60 °C, odpovídající doporučenému teplotnímu rozsahu při zpracování polypropylenů. Procesní parametry vstřikování (viz tab. 4.4) byly nastaveny se zřetelem na materiál a konstrukci vstřikovaného dílu a během experimentu byly udržovány na konstantních hodnotách tak, aby byl zřejmý vliv způsobu a podmínek temperace tvarových částí formy na jejich teplotní pole a případné změny morfologie či fyzikálních vlastností výstřiků.

**Tab. 4.4** Procesní (technologické) parametry vstřikování

Parametr		Značka	Jednotka	Hodnota
teplota válce	na trysce	$T_{tr}$	°C	250
	1. zóna	$T_{v1}$	°C	250
	2. zóna	$T_{v2}$	°C	240
	3. zóna	$T_{v3}$	°C	220
vstřikovací rychlost		$v_v$	$m \cdot min^{-1}$	35
mez vstřikovacího tlaku		$p_v$	MPa	56
dotlak		$p_d$	MPa	43,5
doba působení vstřikovacího tlaku		$t_v$	s	2
doba působení dotlaku		$t_d$	s	5
doba chlazení		$t_{ch}$	s	25
doba odformování		$t_o$	s	4
ostatní strojní časy		$t_s$	s	14
celková doba vstřikovacího cyklu		$t_c$	s	45
uzavírací síla		$F_u$	N	max. 250 000

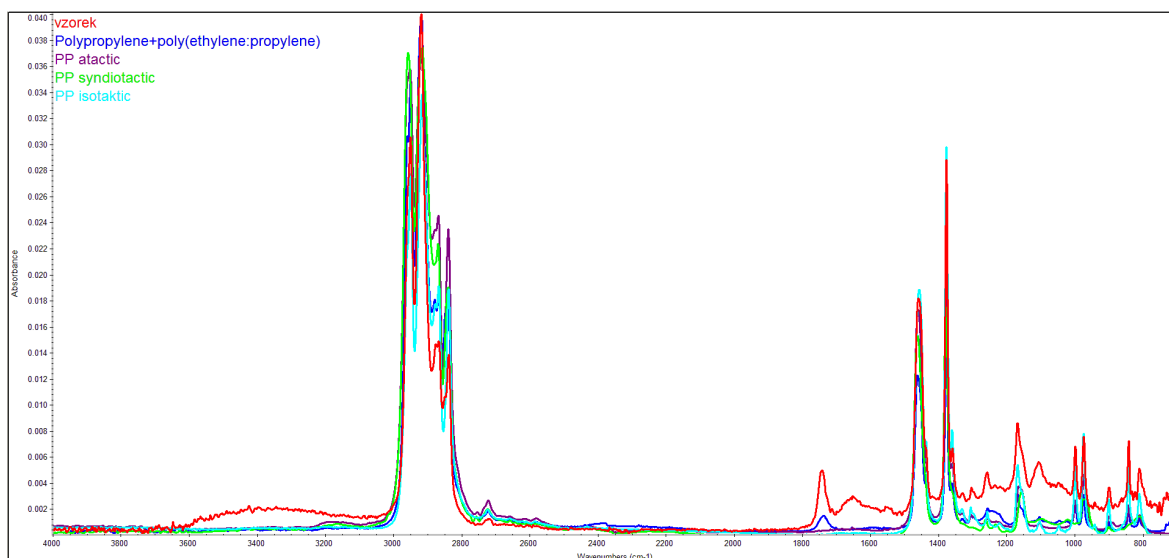


Obr. 4.10 Schéma temperačních prostředků experimentálního výzkumu

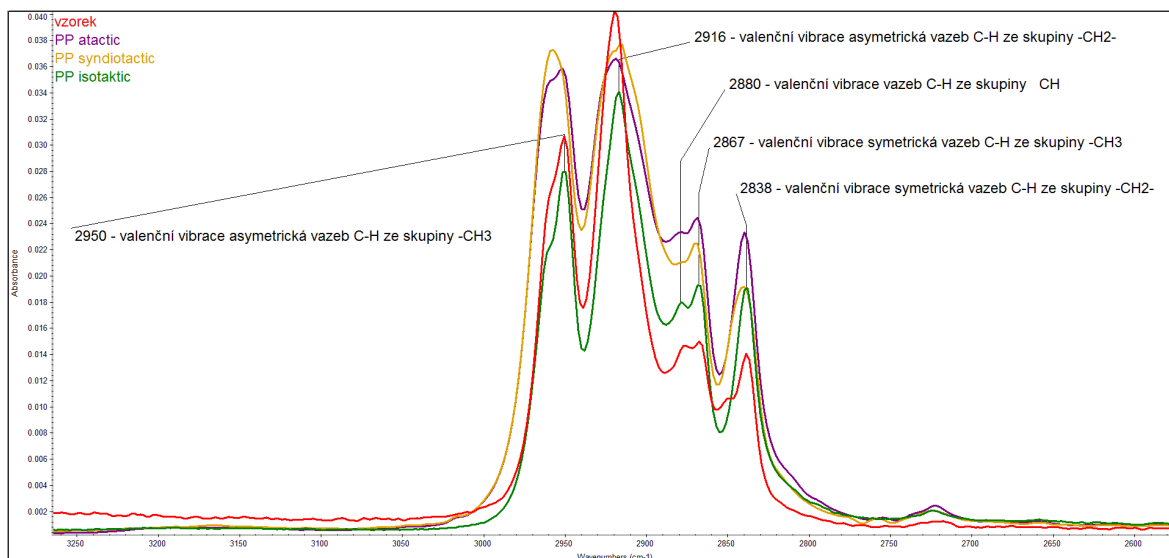
## 4.2 Použitý polypropylen

S ohledem na geometrii vstřikovaného dílu (zejména na jeho tloušťku stěny) a konstrukci vtokové soustavy formy byl pro výzkum vlivu teploty vstřikovacích forem na kvalitu tenkostěnných polypropylenových výstřiků vybrán polypropylen Mosten MT 230 z portfolia rafinérské petrochemické skupiny Unipetrol, a.s. Litvínov. Při volbě polypropyleny byly přitom sledovány dva základní požadavky: použít polypropylen s odpovídajícími tokovými vlastnostmi taveniny, který umožní výrobu dílů bez jejich povrchových vad a současně aplikovat takový polypropylen, jehož struktura bude odpovídat homopolymeru bez vyztužujících aditiv (vzhledem k následnému hodnocení krystalizace výstřiků, resp. jejich morfologické struktury). Z teoretických poznatků je zřejmé, že snadněji krystalizují polymery se symetrickou stavbou makromolekul, pravidelnou strukturou hlavních řetězců, ale také polymery bez příměsí dalších polymerů [2]. Z tohoto důvodu byl vybrán homopolymer, tedy materiál, jehož makromolekuly se skládají z merů jednoho druhu (propylen: nenasyceného uhlovodíku), neboť např. kopolymery stericky rozdílných monomerů krystalizují obtížně nebo vůbec.

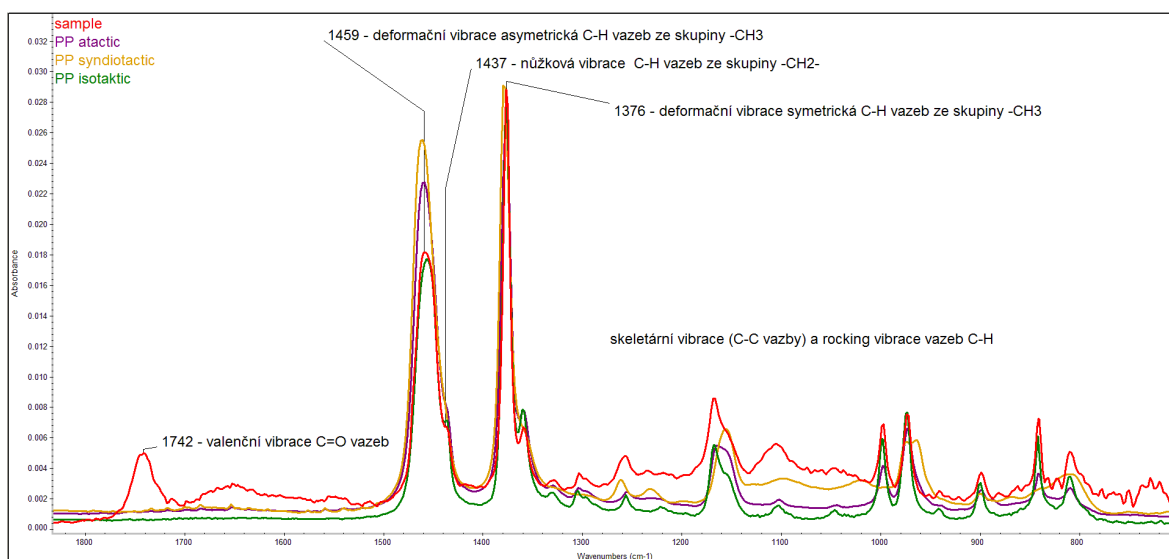
Polypropylen Mosten MT 230 je vysokotekoucí homopolymer s úzkou distribucí molekulových hmotností vhodný pro vstřikování do vícenásobných forem a pro výrobu tenkostěnných výstřiků [130]. Na základě analýzy infračervené spektroskopie se ze strukturálního hlediska jedná o izotaktický polypropylen s přítomností slabého pásu C=O (*přídavek aditiva*), který může poukazovat na přítomnost tzv. ionomerů, které jsou založeny na polyethylenu s karboxylovou skupinou, nacházející se podél uhlovodíkového řetězce. Infračervené spektrum polypropylenu Mosten MT 230, resp. grafické zobrazení energie vyjádřené v jednotkách absorpce (*definované jako dekadický logaritmus*) v závislosti na vlnové délce dopadajícího záření (*vlnočtu*) je v porovnání s knihovními spektry polypropylenů různé stereoizometrie (*prostorové pravidelnosti*) uvedeno na obr. 4.11, resp. v detailech rozhraní vlnočtů na obr. 4.12 a obr. 4.13 (*včetně popisu vrcholů absorpčních pásů*). Spektrální analýza materiálu byla provedena odrazovou technikou na zařízení Nicolet iZ10 pomocí metody vícenásobné zeslabené totální (*úplné*) reflexe záření na fázovém rozhraní vzorku s krystalem germania. Měření bylo provedeno ve spektrálním rozsahu vlnočtů  $(4000 \div 700) \text{ cm}^{-1}$ , s 8 skeny, rozlišením  $4,0 \text{ cm}^{-1}$  a ATR korekcí. Pravidelnost molekulárního řetězce polypropylenu Mosten MT 230 (*daná izotaktickou strukturou*) podmiňuje jeho nadmolekulární uspořádání a rozhoduje o jeho schopnosti krystalizace a tím také o makroskopických vlastnostech materiálu. Základní fyzikální a mechanické vlastnosti materiálu jsou zaznamenány v tab. 4.5. Jedná se o vlastnosti uváděné výrobcem v souladu s předpisem ČSN EN ISO 1873-2 [131].



**Obr. 4.11** Infračervené spektrum PP Mosten MT 230 v porovnání s knihovními spektry PP



**Obr. 4.12** Část infračerveného spektra PP Mosten MT 230 pro popis funkčních skupin C-H v porovnání s knihovními spektry PP



**Obr. 4.13** Část infračerveného spektra PP Mosten MT 230 pro popis deformačních vibrací v porovnání s knihovními spektry PP



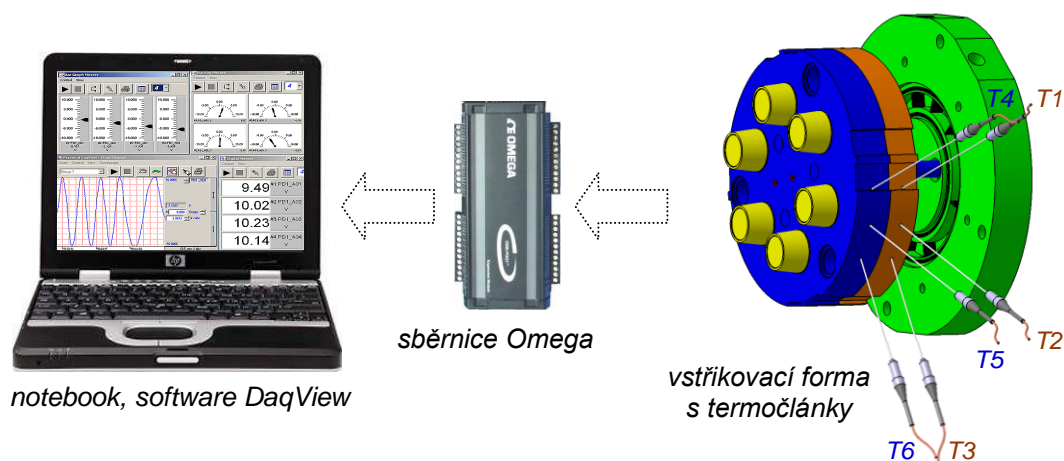
**Tab. 4.5** Typické vlastnosti polypropylenu Mosten MT 230 [130]

Vlastnost	Značka	Jednotka	Typická hodnota	Předpis (metoda)
Hmotnostní index toku taveniny (230/2, 16)	$MFR$	$g \cdot 10min^{-1}$	30	ISO 1133-1
Napětí na mezi kluzu	$\sigma_y$	$MPa$	38	ISO 527/1A/50
Poměrné prodloužení při přetržení	$\varepsilon_b$	%	40	ISO 527/1A/50
Modul pružnosti v ohybu	$E_f$	$MPa$	1850	ISO 178
Vrubová houževnatost Charpy	$a_{cA}$	$kJ \cdot m^{-2}$	2	ISO 179-1/1eA
Teplota měknutí dle Vicata	$VST$	$^{\circ}C$	155	ISO 306
Teplota průhybu při zatížení (1,8 MPa)	$T_{ff}$	$^{\circ}C$	60	ISO 75
Teplota píku tání *	$T_{p,m}$	$^{\circ}C$	166	ISO 11357-1
Teplota píku krystalizace *	$T_{p,c}$	$^{\circ}C$	130	ISO 11357-1

Poznámka: \* stanoveno experimentálně pomocí metody DSC na základě druhého teplotního cyklu (s ohledem na tepelnou historii materiálu) dle ISO 11357-1 ( $10^{\circ}C \cdot min^{-1}$ )

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA TEPLOTNÍCH POLÍ

Měření a sledování průběhu teplot v oblasti tvarové vložky tvárníku vstřikovací formy bylo realizováno během procesu vstřikování měřicí sestavou stávající se z termočlánků TJ 36 typu T (*opatřené přechodkou pro vhodný přechod z plášťového termočlánku do kompenzačního vedení s polytetrafluórethylenovou izolací*) a datové sběrnice OMB-DAQ-56 spojené s notebookem pomocí sběrnice USB (viz obr. 5.1). Použitý modulový systém datové sběrnice (řízený programem DaqView) umožňuje 20 jednoduchých nebo 10 diferenčních termočlánekových vstupů s přesností vyvážení spoje termočlánku  $\pm 0,5$  °C, vyznačuje se programovatelným vstupním rozsahem  $\pm 31$  mV až  $\pm 15$  V, měřením frekvence do 1 MHz a vysokou přesností ( $0,015$  % čtení +  $0,002$  % rušivé signály) [132].

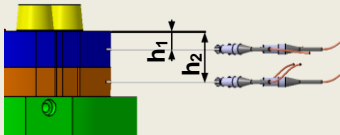
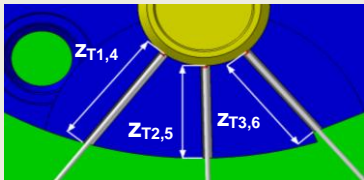


**Obr. 5.1** Měřicí sestava pro sledování a záznam teplotních polí ve vstřikovací formě

Měření transientních teplotních polí bylo provedeno pomocí šesti termočlánků v oblasti jedné monitorované tvarové vložky (tvárníku) umístěné v pohyblivé části formy (viz obr. 5.1). Pro účely sledování teplotních polí byla forma opatřena šesti otvory pro uložení termočlánků v kotevní a stírací desce, které byly zhotoveny kolmo ve směru k povrchu a k ose tvarové vložky a rozmístěny ve vzdálenosti od čela formy (*resp. stírací desky formy*) tak, aby nedošlo k ovlivnění její činnosti a teploty. Vzdálenost otvorů pro umístění termočlánků od čela formy a jejich hloubka od povrchu kotevní a stírací desky je uvedena v tab. 5.1. Z obr. 5.1 je zřejmé, že termočlánky s označením T1, T2 a T3 byly umístěny v rovině procházející polovinou tloušťky kotevní, resp. stírací desky pro případ termočlánků T4, T5 a T6. K zajištění dobré tepelné vodivosti mezi povrchem formy a měřicí částí termočlánků bylo použito tepelně vodivé pasty.

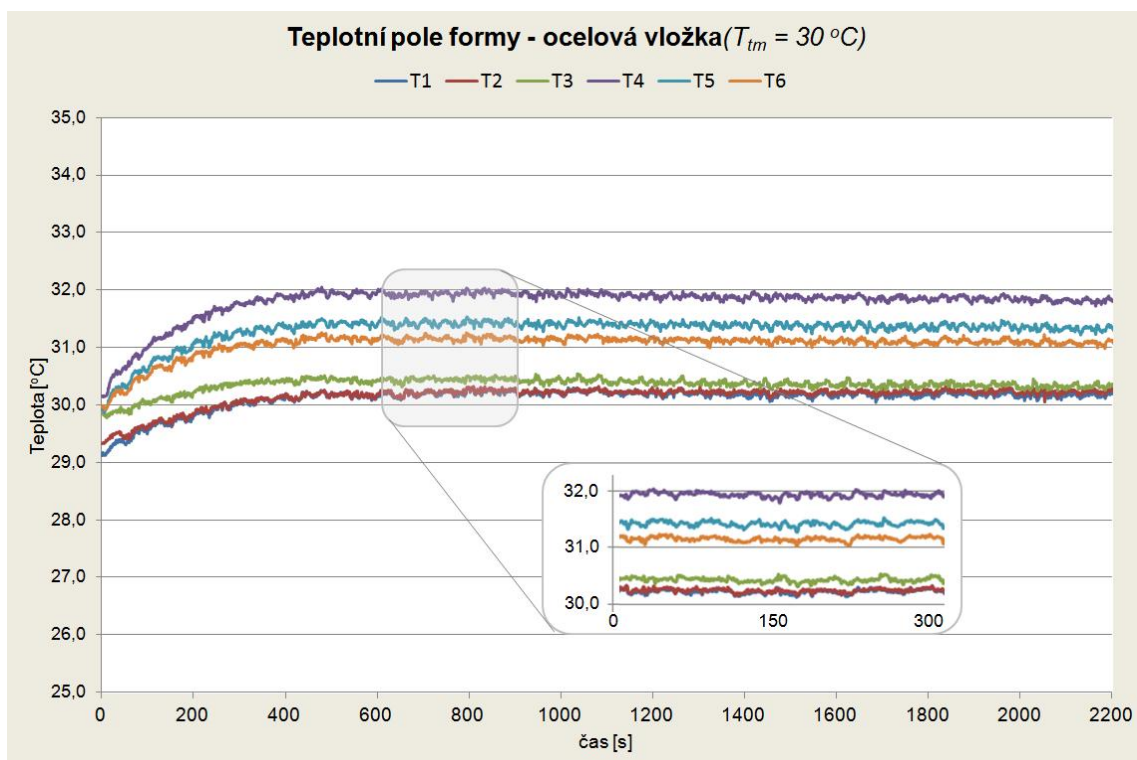


**Tab. 5.1** Pozice termočlánků ve vstřikovací formě

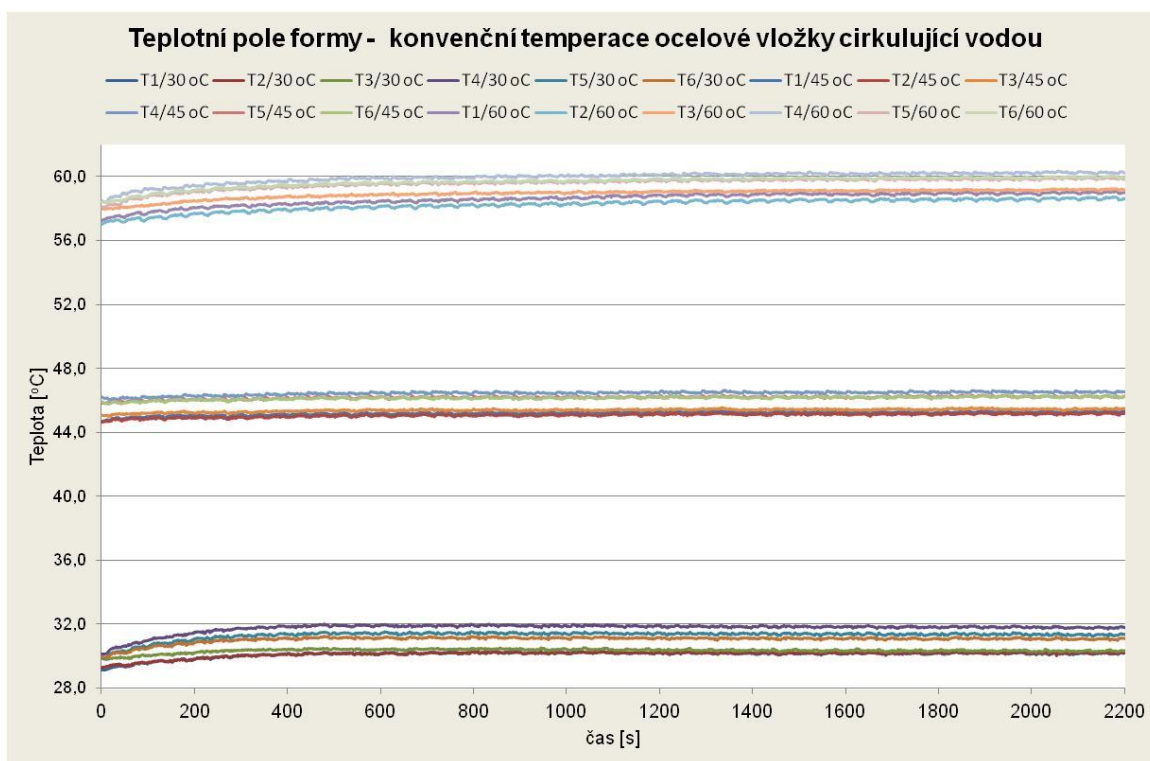
Schéma	Značení	Pozice termočlánků					
		v kotevní desce formy			ve stírací desce formy		
		T1	T2	T3	T4	T5	T6
Vzdálenost od čela formy (stírací desky)							
	$h$ [ $10^{-3}$ m]	$h_2 = 50$			$h_1 = 18$		
Hloubka otvoru od povrchu formy (kotevní a stírací desky)							
	$z$ [ $10^{-3}$ m]	41,5	30	41	36,5	25,5	31

Při měření teplotních polí v oblasti tvarové vložky vstřikovací formy byl současně po spuštění automatického chodu vstřikovacího lisu zahájen záznam hodnot elektrických napětí z termočlánků, které byly datovou sběrnicí převáděny na stupnici ve stupních Celсия. Zaznamenané hodnoty (*pro různé způsoby a podmínky temperace formy*) byly v intervalu jedné sekundy ukládány do datových souborů a následně graficky zpracovány jako závislost teploty na čase a pozici činného konce termočlánku umístěného ve vstřikovací formě. Záznamy, jakož i následné hodnocení a diskuse teplotních polí ve vstřikovací formě, jsou uvedeny v kap. 5.1 až kap. 5.4 v časovém intervalu 300 s od okamžiku, kdy bylo po zahájení měření teplot ve vybraných místech vstřikovací formy (*pro všechny temperační systémy*) dosaženo ustáleného teplotního pole, viz obr. 5.2 (*netýká se temperace stlačeným vzduchem*). V případě aplikace Ranque-Hilsch vírové trubice (*viz kap. 5.1*) je záznam časové závislosti teploty zobrazen i s náběhovou fází (*tedy od okamžiku ohřátí formy na požadovanou teplotu a spuštění vstřikovacího lisu*), neboť po celou dobu měření a vstřikování (*ca. 3000 s*) nedošlo k ustálení teplotního pole v nástroji.

Vzhledem ke skutečnosti, že nekonvenční způsoby temperace tvarové vložky jsou v následujících kapitolách porovnávány s konvenčním způsobem chlazení (*využívající cirkulující vody v temperačních kanálech tvarových částí pohyblivé i pevné části formy*) je na obr. 5.3 zobrazeno teplotní pole v oblasti ocelové tvarové vložky tvárníku temperované vodou (*systémem přepážkového způsobu chlazení*) a to při všech třech teplotách teplosměnného média (*vody*).



**Obr. 5.2** Teplotní pole formy v oblasti ocelové tvarové vložky ( $T_{tm} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ )  
s příkladem zobrazení detailu v časovém intervalu 300 s po ustálení teploty ve formě

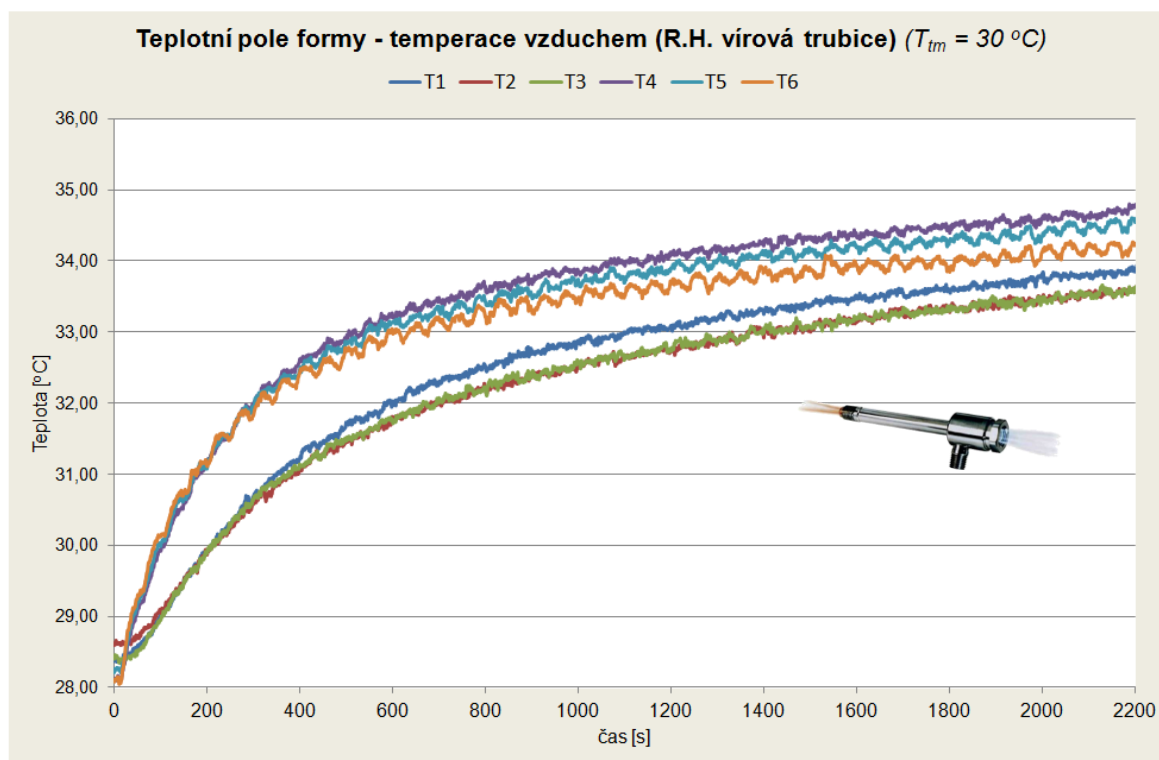


**Obr. 5.3** Teplotní pole v oblasti ocelové tvarové vložky  
temperované konvenčním způsobem (cirkulující vodou o teplotě  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

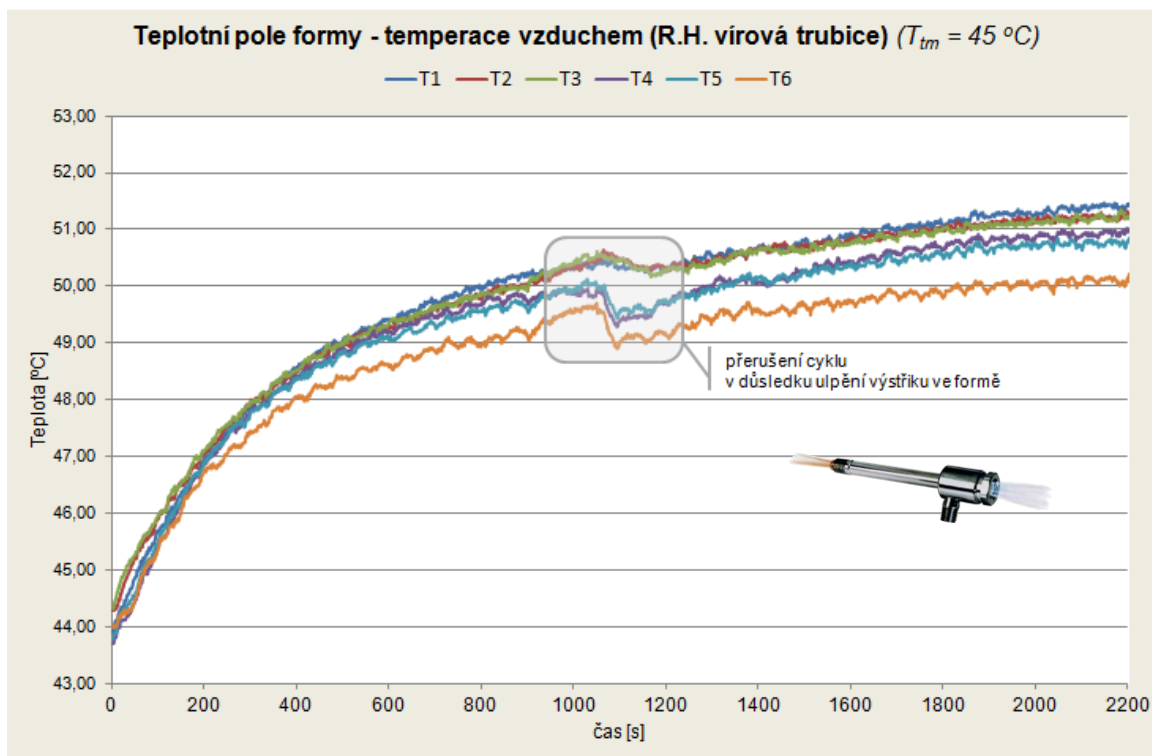
## 5.1 Teplotní pole formy při aplikaci Ranque-Hilsch vírové trubice

Grafický záznam průběhu teplot na čase ve vybraných místech vstřikovací formy v oblasti ocelové vložky, temperované stlačeným vzduchem pomocí Ranque-Hilsch vírové trubice, je zobrazen na obr. 5.4 při teplotě vzduchu 30 °C, resp. na obr. 5.5 při teplotě vzduchu 45 °C. Vzhledem ke skutečnosti, že při temperaci vzduchem nebylo dosaženo ustáleného teplotního pole (*na rozdíl od temperace vodou, viz obr. 5.3*), nebylo měření při teplotě vzduchu 60 °C již dále realizováno. Vzájemné porovnání teplotních polí vstřikovací formy při temperaci tvarové vložky vodou a vzduchem je graficky znázorněno na obr. 5.6 a obr. 5.7.

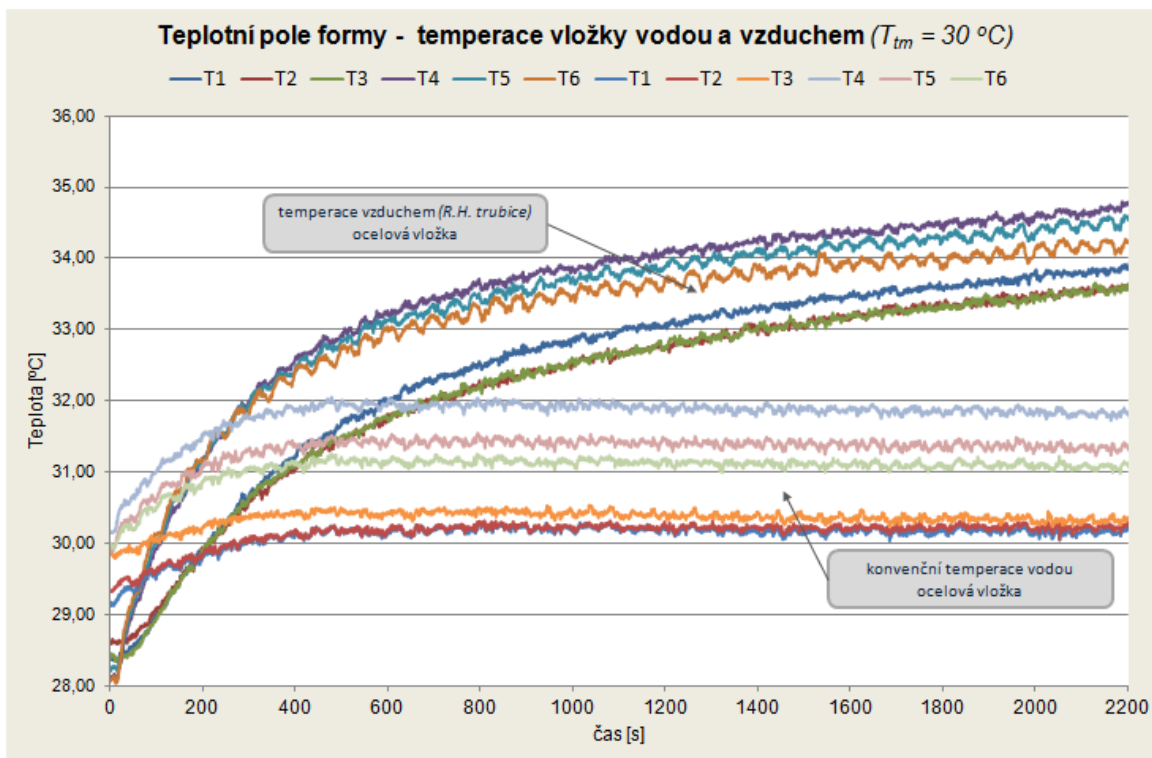
Teplota vzduchu vstupujícího do dutiny tvarové vložky z vírové trubice (30 °C a 45 °C) byla při nastaveném konstantním poměru objemu vystupujícího vzduchu z obou konců vírové trubice, který je ovládán jehlovým ventilem na horkém výfuku, regulována velikostí tlaku vzduchu na vstupu do stacionárního generátoru trubice (*pomocí redukčního ventilu*), viz obr. 4.5 a příloha 3. Pevná část formy (*tvárnice*) byla temperována vždy vodou cirkulující v temperačních kanálech okruhu 1, 2a a 2b (*dle obr. 4.2*), analogicky jako v dalších případech aplikace nekonvenčních temperačních prostředků. Teplota temperačních médií v obou částech formy (*vody a vzduchu*) byla shodná.



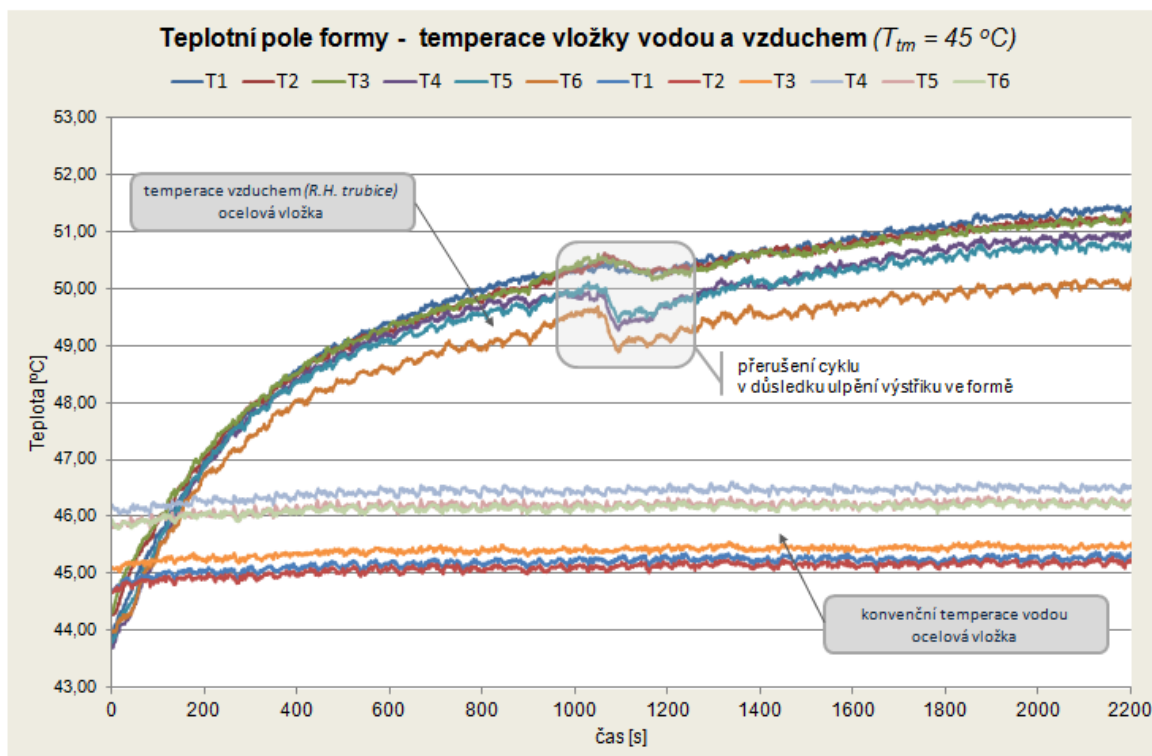
**Obr. 5.4** Teplotní pole formy v oblasti ocelové tvarové vložky temperované vzduchem pomocí Ranque-Hilsch vírové trubice ( $T_{tm} = 30\text{ °C}$ )



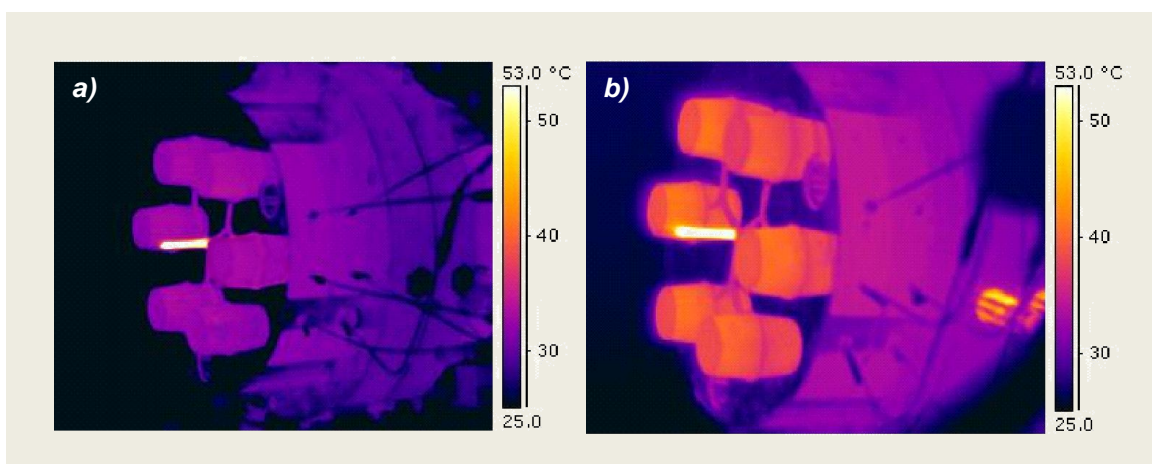
**Obr. 5.5** Teplotní pole formy v oblasti ocelové tvarové vložky temperované vzduchem pomocí Ranque-Hilsch vírové trubice ( $T_{tm} = 45\text{ °C}$ )



**Obr. 5.6** Teplotní pole formy v oblasti ocelové tvarové vložky temperované vodou nebo vzduchem pomocí Ranque-Hilsch vírové trubice ( $T_{tm} = 30\text{ °C}$ )



**Obr. 5.7** Teplotní pole formy v oblasti ocelové tvarové vložky temperované vodou nebo vzduchem pomocí Ranque-Hilsch vírové trubice ( $T_{tm} = 45\text{ °C}$ )



**Obr. 5.8** Teplotní pole výstřiků při temperaci tvarové vložky vodou (a) a vzduchem (b) o teplotě  $30\text{ °C}$  (záznam termovizního měření kamerou ThermoCAM P65, emisivita: 0,96)

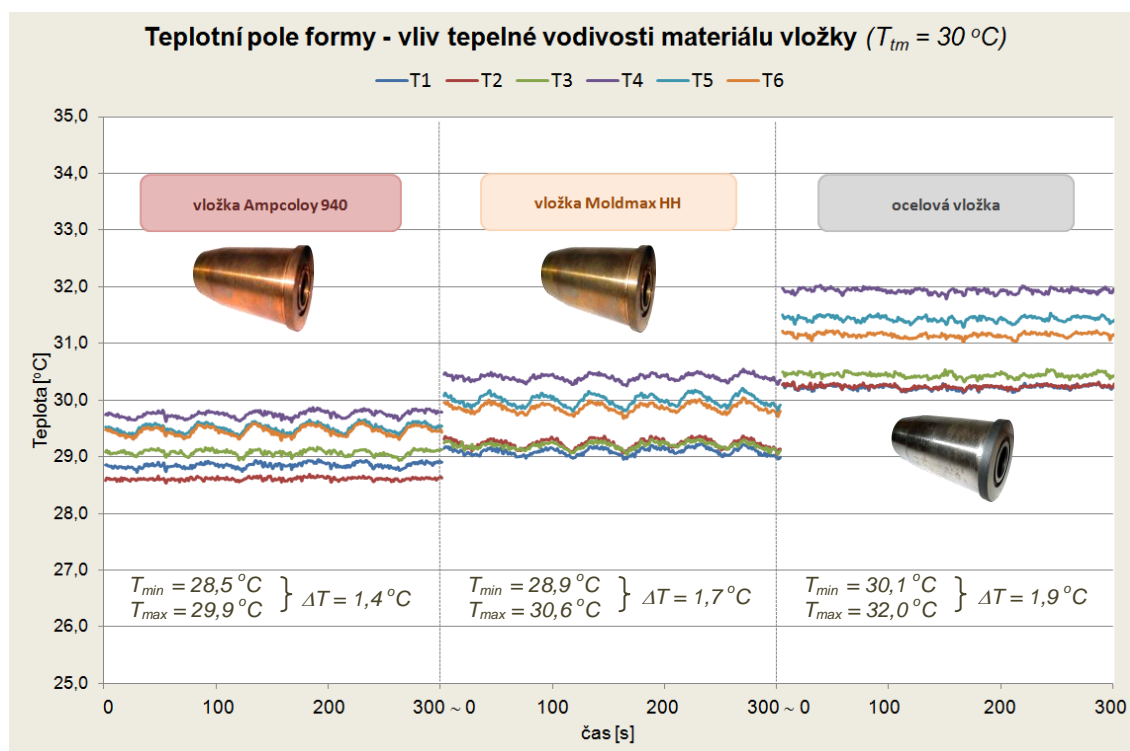
Z grafických závislostí teplot na čase ve vybraných místech vstřikovací formy v oblasti tvarové vložky temperované vodou nebo vzduchem pomocí vírové trubice lze konstatovat, že při temperaci tvarové vložky vzduchem je dosažení rovnováhy mezi přivedeným a odvedeným teplem ve formě (tj. "konstantní" časové závislosti teploty v nástroji během procesu vstřikování) velmi náročné, resp. této rovnováhy nebylo během měření (odpovídající  $> 50$  vstřikovacím cyklům) dosaženo (na rozdíl od konvenčního případu temperace



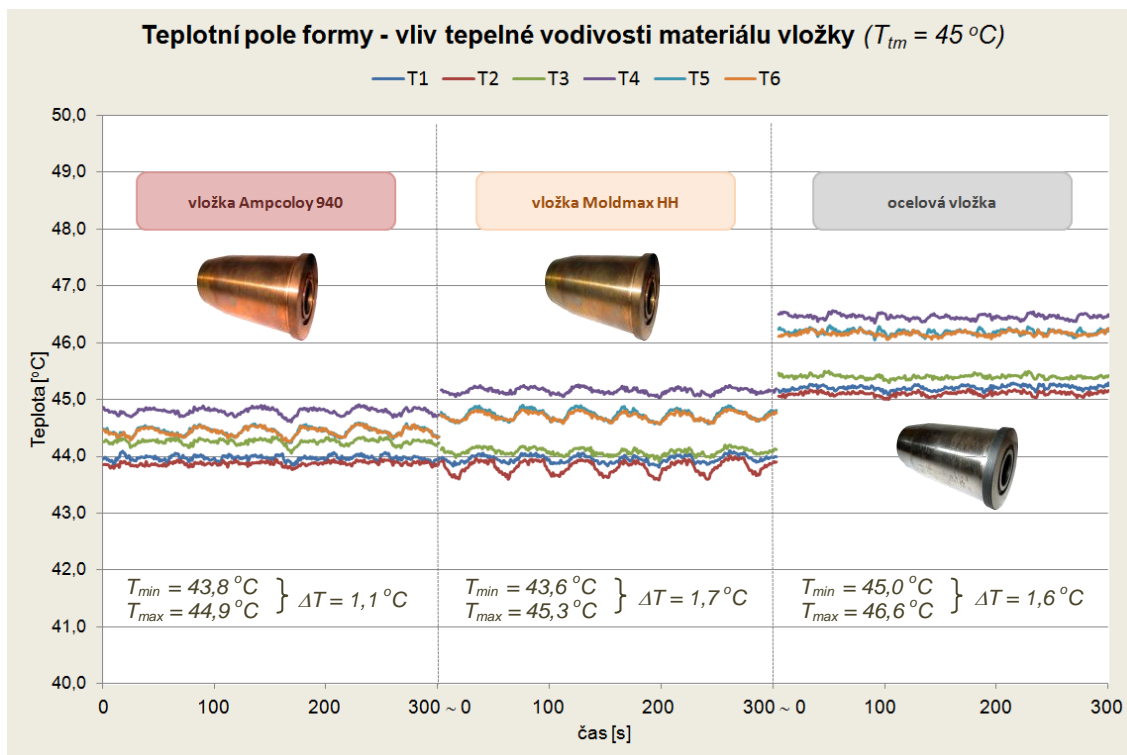
tvárové vložky vodou). Množství odvedeného tepla z tvarové vložky formy pomocí stlačeného vzduchu (*vycházejícího z horkého výfuku vírové trubice*) je vzhledem k jeho nízké tepelné vodivosti malé. V důsledku toho se teplota v nástroji během následných výrobních cyklů zvyšuje a dosahuje větších a nestabilních hodnot, než by bylo dosaženo při temperaci vodou o stejné teplotě. Tyto závěry potvrzují také pořízené termovizní snímky povrchových teplot výstřiků v okamžiku bezprostředně po otevření formy a před jejich vyhozením z nástroje pomocí stírací desky, které jsou v ukázce uvedeny na obr. 5.8 (*pro případ teploty temperačních médií 30 °C*). Tato skutečnost má přímý vliv na kvalitu výstřiků, neboť jejich teplota při vyjímání z formy, ale i podmínky chlazení se s rostoucím počtem cyklů pro každý díl mění a v jednotlivých výrobních cyklech tak nelze zajistit reprodukovatelnost jejich kvality (*tzn. krystalickou strukturu, velikost smrštění, vnitřní napětí, apod.*).

## 5.2 Teplotní pole formy při aplikaci vysoce tepelně vodivých materiálů

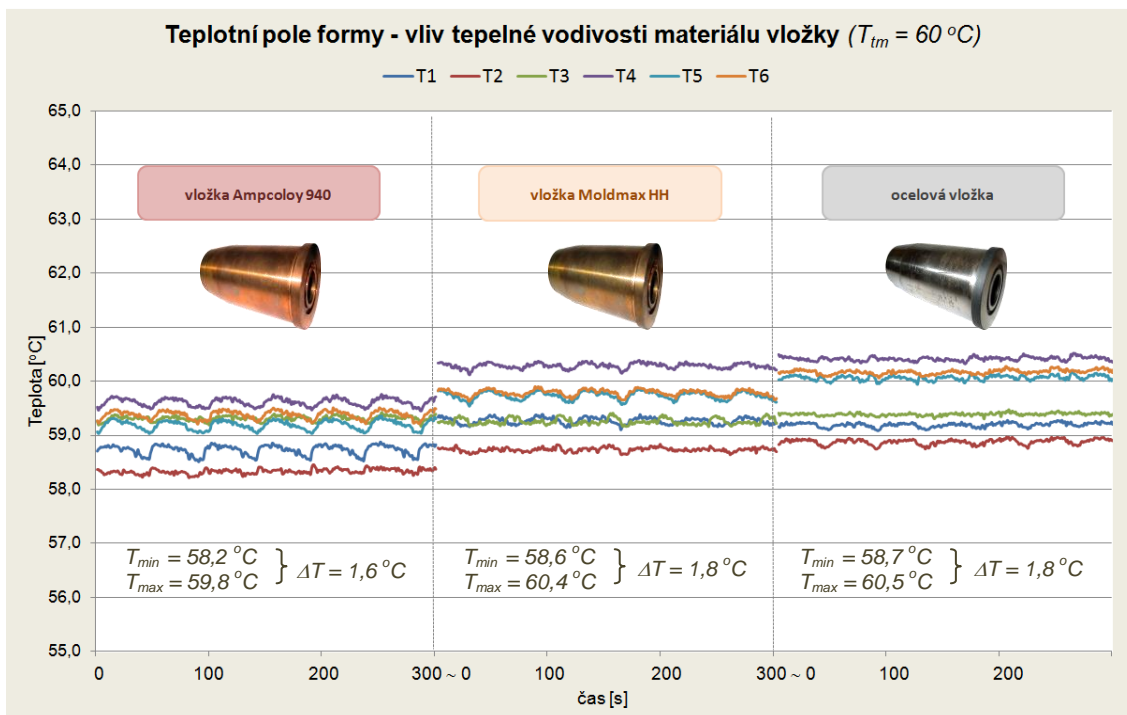
Grafické záznamy teplotních polí při aplikaci tvarové vložky z vysoce legovaných slitin na bázi mědi Ampcoloy 940 a Moldmax HH jsou zobrazeny na obr. 5.9 až obr. 5.11 (*v závislosti na teplotě temperačního média*). Temperace tvarových vložek byla zajištěna cirkulující vodou pomocí přepážkového systému (*obdobně jako v případě tvarové vložky z oceli*).



**Obr. 5.9** Teplotní pole formy v oblasti tvarové vložky  
v závislosti na tepelné vodivosti materiálu ( $T_{tm} = 30\text{ °C}$ )

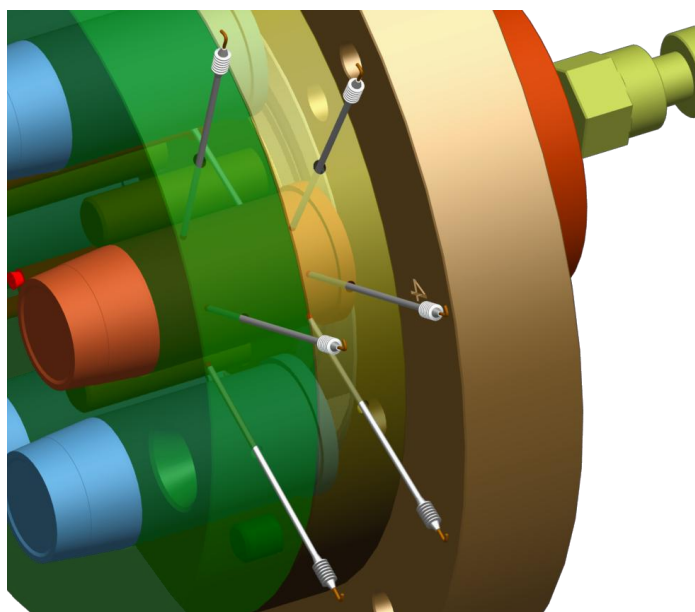


**Obr. 5.10** Teplotní pole formy v oblasti tvarové vložky  
v závislosti na tepelné vodivosti materiálu ( $T_{tm} = 45^\circ\text{C}$ )



**Obr. 5.11** Teplotní pole formy v oblasti tvarové vložky  
v závislosti na tepelné vodivosti materiálu ( $T_{tm} = 60^\circ\text{C}$ )

Teplotní pole na obr. 5.9 až obr. 5.11 znázorňují rozložení teplot ve vybraných místech vstřikovací formy (*opatřených termočlánky T1 až T6*) v časovém intervalu 300 s po jejich ustálení ve formě (*viz příklad na obr. 5.2*) a umožňují vzájemné porovnání vlivu tepelné vodivosti materiálu formy (*resp. tvarové vložky*) na odvod tepla z nástroje a výstřiku. Aplikací vysoce tepelně vodivých materiálů na bázi mědi došlo k intenzivnějšímu odvodu tepla z nástroje, resp. z taveniny polymeru do stěn tvarové vložky a temperačního kanálu s cirkulující vodou. Vyšší intenzity chlazení tvarové části formy bylo podle očekávání zaznamenáno u vložky zhotovené ze slitiny Ampcoloy 940, která vykazuje přibližně dvakrát vyšší tepelnou vodivost, než slitina Moldmax HH (*viz tab. 4.3*). Největší účinnost v odvodu tepla vykazují vysoce tepelně vodivé materiály při temperaturaci tvarové vložky vodou o teplotě 30 °C. Při aplikaci slitiny Ampcoloy 940 a teplotě temperačního média 30 °C byl experimentálně naměřen pokles teplotního pole proti případu výroby výstřiku ve formě s ocelovou vložkou o 6 %, resp. o 3 % a 1 % pro případy teplot temperačního média 45 °C a 60 °C. Zjištěné výsledky mohou při prvním pohledu působit jako nevýznamné, je třeba si však uvědomit skutečnost, že měření teplotních polí v oblasti tvarové vložky bylo realizováno termočlánky umístěnými v kotevní a stírací desce formy, tzn. mimo oblast tvarové dutiny formy zaplněné taveninou plastu (*s ohledem na možnosti experimentu dané konstrukcí formy*), kde se realizuje sdílení tepla z taveniny do vložky, temperačního média a ostatních částí formy (*viz obr. 5.12*). Naměřená teplotní pole ve formě tak více než na odvod tepla z tvarové dutiny formy poukazují na míru rovnoměrnosti rozložení teplot v nástroji, resp. na povrchu jeho tvarových částí (*v souladu s cíli disertační práce*).



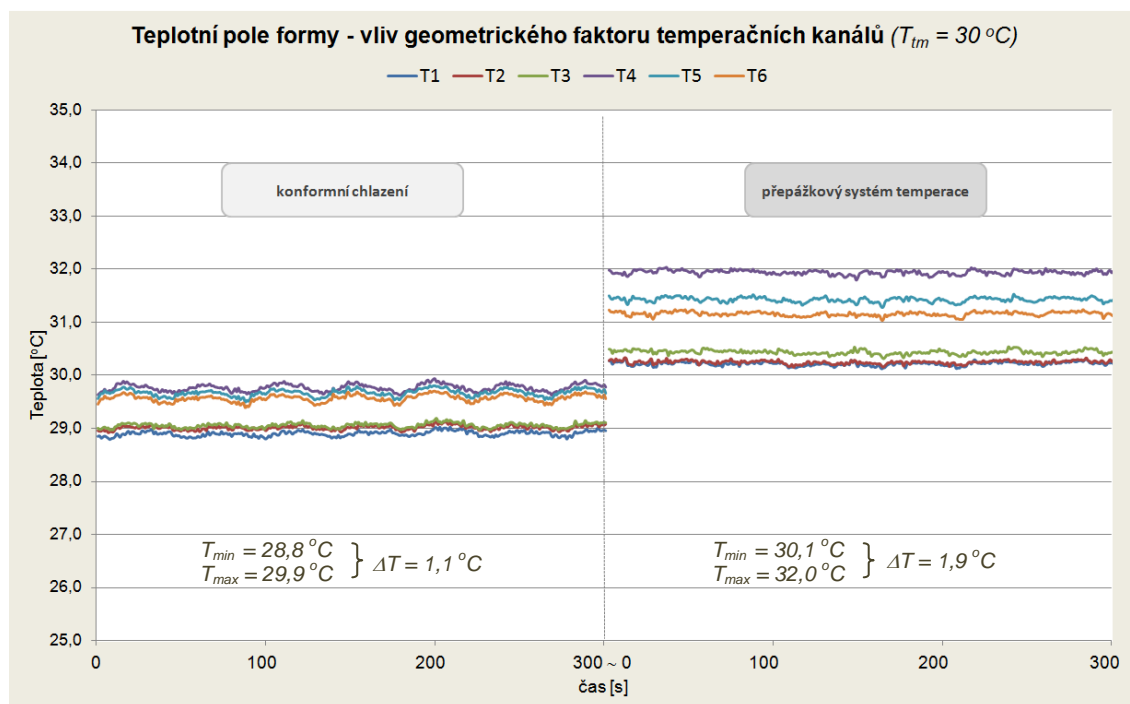
**Obr. 5.12** Schéma umístění termočlánků v kotevní a stírací desce pohyblivé části formy



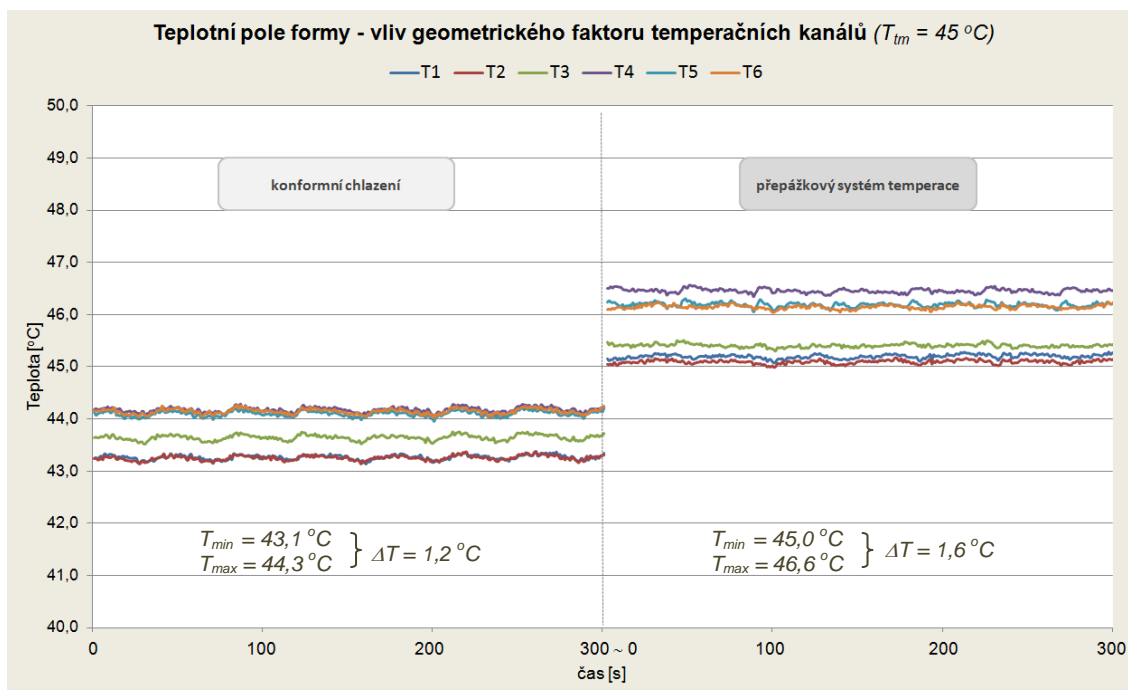
S ohledem na praktickou aplikaci vysoce tepelně vodivých materiálů pro tvarové prvky vstřikovací formy je tedy důležité zjištění, že vysoce tepelně vodivé materiály přispívají k rovnoměrnému rozložení teplotního pole v nástroji. Tato skutečnost je zřejmá z rozdílu teplot v měřených místech ve formě v oblasti ocelové a měděné vložky. Nejnižšího rozdílu teplot mezi sledovanými místy ve formě bylo zjištěno v případě s tvarovou vložkou Ampcoloy 940 a například při její teplotě vodou o teplotě 30 °C je míra homogenity teplotního pole ca. o 26 % lepší, než v případě aplikace ocelového tvárníku. Homogenita teplotního pole výstřiku a formy je přitom velmi důležitým faktorem ovlivňující kvalitu vstřikovaných dílů, zejména jejich vlastnosti, vnitřní napětí, tvarovou i rozměrovou přesnost, apod.

### 5.3 Teplotní pole formy při aplikaci konformního způsobu chlazení

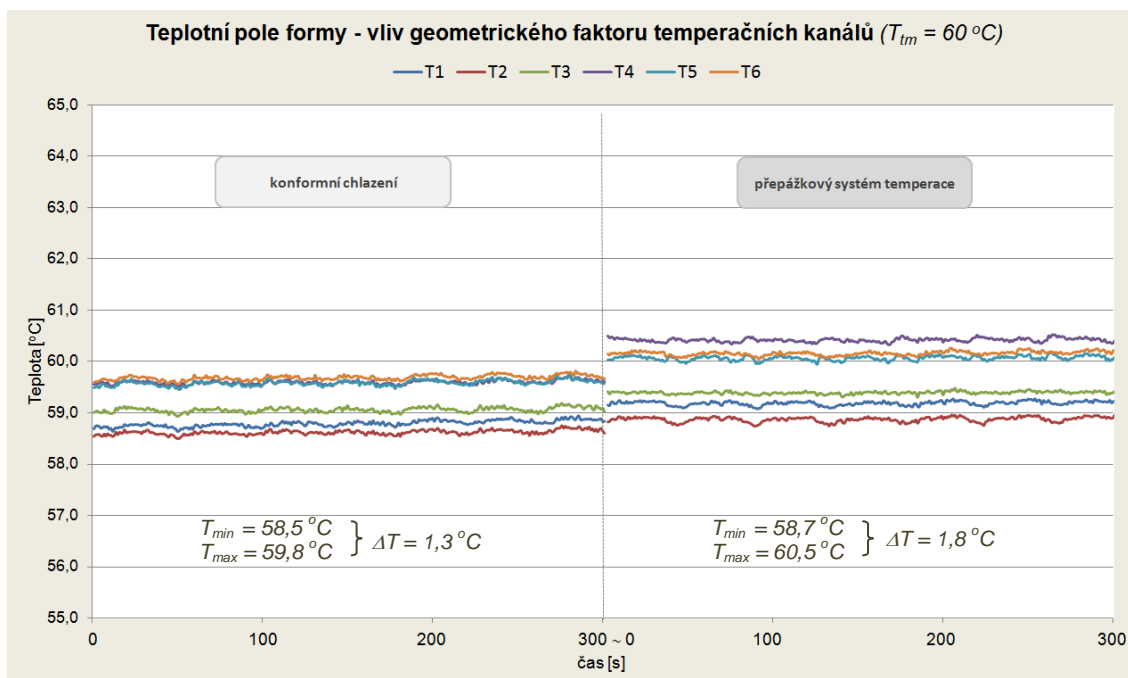
Grafické záznamy teplotních polí v oblasti ocelové vložky s temperačními kanály kopírující její povrch (tzv. *konformní chlazení*), zhotovené spékáním kovových prášků metodou „DMLS“ (*Direct Metal Laser Sintering*), jsou zobrazeny na obr. 5.13 až obr. 5.15 (v závislosti na teplotě teplotního média, tj. cirkulující vody). Časový průběh teplot ve vstřikovací formě je opět zobrazen v intervalu 300 s po jejich ustálení a porovnán s teplotním průběhem v nástroji pro případ standardní ocelové vložky temperované cirkulující vodou ve vnitřním (vrtaném) kanálu s přepážkovým systémem.



**Obr. 5.13** Teplotní pole formy v oblasti ocelové tvarové vložky při konvenčním (přepážkovém systému) a konformním chlazení cirkulující vodou ( $T_{tm} = 30\text{ °C}$ )



**Obr. 5.14** Teplotní pole formy v oblasti ocelové tvarové vložky  
při konvenčním (přepážkovém systému) a konformním chlazení cirkulující vodou ( $T_{tm} = 45\text{ °C}$ )



**Obr. 5.15** Teplotní pole formy v oblasti ocelové tvarové vložky  
při konvenčním (přepážkovém systému) a konformním chlazení cirkulující vodou ( $T_{tm} = 60\text{ °C}$ )

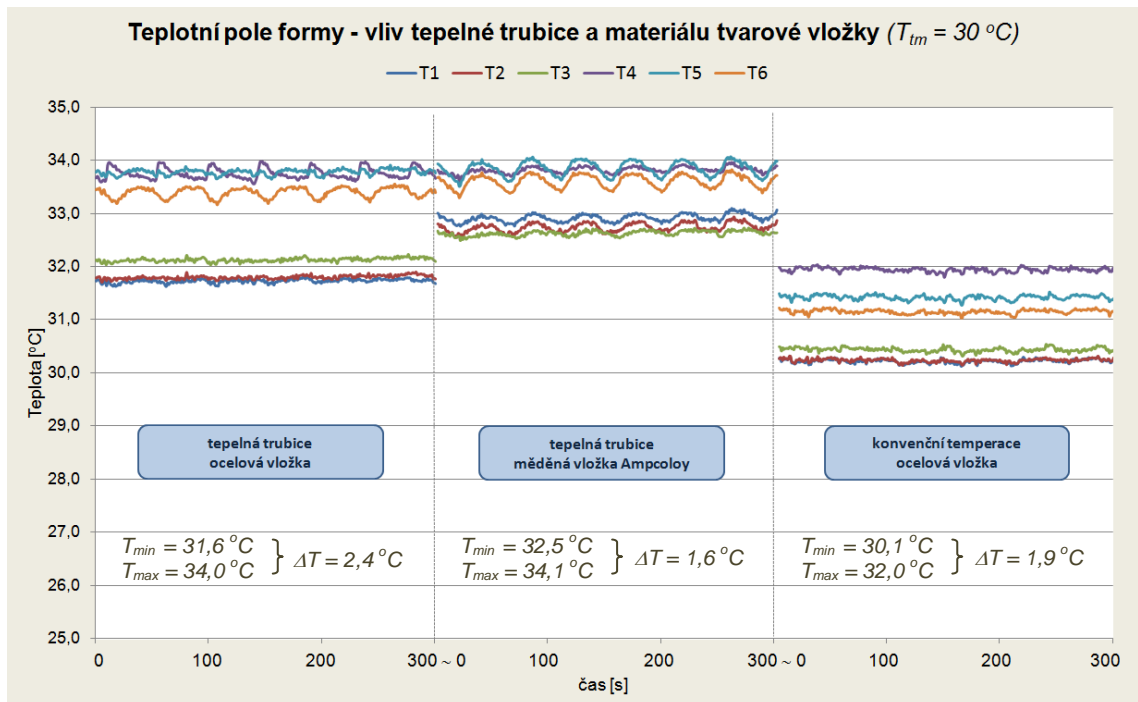
Grafické záznamy teplotních profilů ve sledovaných místech (*oblastí*) tvarové vložky vstřikovací formy (*tj. v místech vzdálených od vlastní tvarové dutiny formy, vzhledem k možnostem dané její konstrukcí*) jsou ovlivněny cirkulující vodou (*teplonosným médiem*) v temperačních kanálech ve tvaru šroubovice. Tento způsob chlazení způsobuje, že v úzké oblasti povrchu (*objemu*) tvarové vložky cirkuluje v jednom z temperačních kanálů chladnější teplonosné médium (*směrem k vrcholu tvarové vložky do oblasti tvarové dutiny formy*) a v druhém teplonosné médium o vyšší teplotě (*v důsledku sdílení tepla z taveniny polymeru*) směřující z tvarové dutiny formy zpět do hlavního temperačního kanálu v upínací desce pohyblivé části formy. Z tohoto důvodu vypovídají teplotní profily opět více o míře homogenity teplotních polí v nástroji, než intenzitě odvodu tepla z taveniny plastu v dutině formy, vycházející z velikosti součinitele prostupu tepla (*viz příloha 8*) a teplosměnné plochy.

V případě konformního způsobu chlazení došlo k zrovnoměnění teplotního pole v nástroji, které má příznivý vliv na kvalitu výstřiků. Nejnižšího rozdílu teplot mezi sledovanými místy ve formě bylo zjištěno při teplotě temperace 30 °C a míra zlepšení homogenity teplotního pole zde dosahuje hodnoty ca. 42 %. Při podmínkách temperace 45 °C a 60 °C je rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší teplotou ve sledovaných místech formy o 25 %, resp. 28 % příznivější (*vzhledem ke konvenčnímu systému chlazení*).

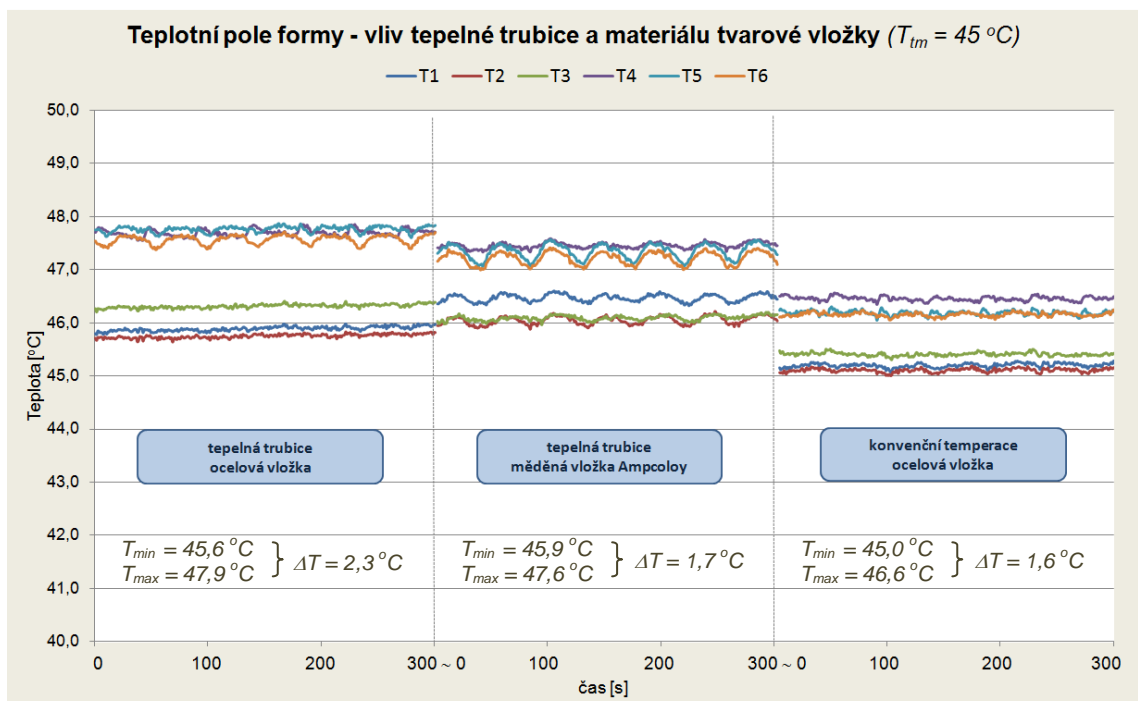
Účinnost chlazení tvarové vložky zhotovené spékáním kovových prášků je ovlivněna geometrickým faktorem temperačních kanálů. Metoda „DMLS“ umožnila vytvořit systém kanálů menšího průřezu, s větší teplosměnnou plochou a menší vzdáleností mezi povrchem tvarové vložky a temperačním kanálem. Všechny tři uvedené faktory příznivě ovlivňují sdílení tepla mezi formou a temperačním médiem, tzn. vedení tepla rovinou stěnou a jeho přestup do temperačního média, které lze vyjádřit Fourierovým a Newtonským zákonem.

## 5.4 Teplotní pole formy při aplikaci tepelné trubice

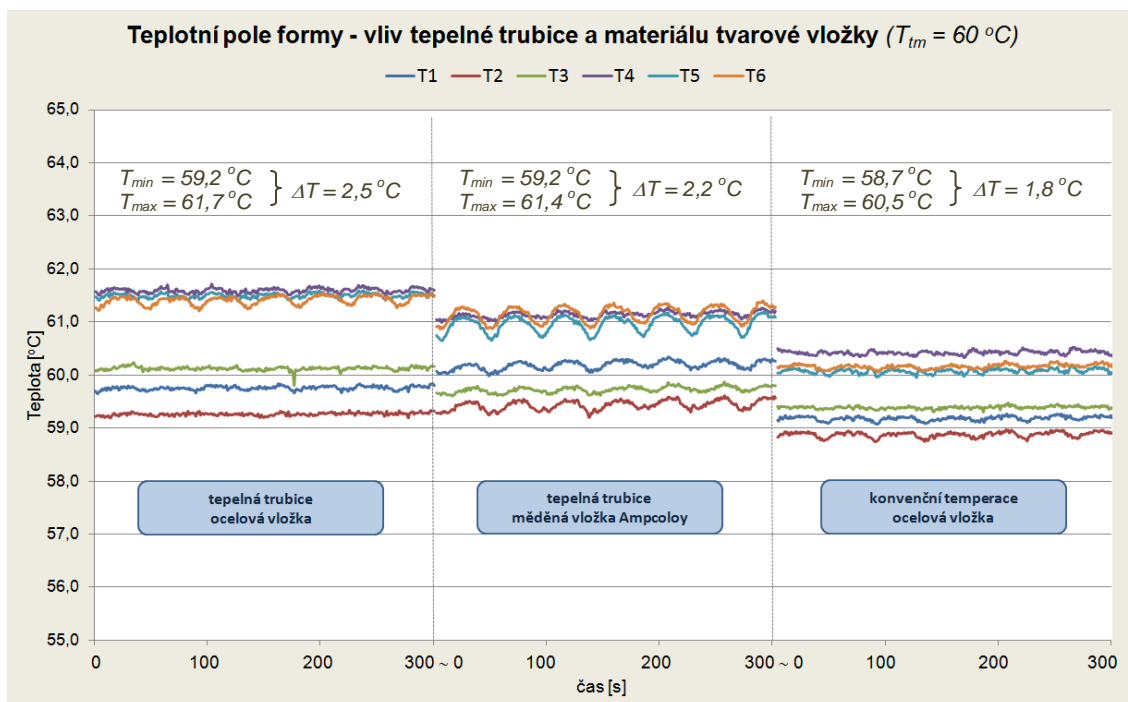
Grafické záznamy teplotních polí pro případ temperace tvarové vložky tepelnou trubicí jsou zobrazeny na obr. 5.16 až obr. 5.18. Kondenzační (*smáčená*) část tepelné trubice ústí do hlavního temperačního kanálu v upínací desce pohyblivé části formy s cirkulující vodou o teplotě 30 °C, 45 °C nebo 60 °C (*viz obr. 4.6*). Uvedené případy znázorňují rozložení teplot v oblasti ocelové i měděné vložky ze slitiny Ampcoloy 940, které jsou porovnány s případem standardní ocelové vložky temperované cirkulující vodou ve vedlejším vrtaném temperačním kanálu s přepážkovým systémem.



**Obr. 5.16** Teplotní pole formy v oblasti ocelové a měděné tvarové vložky při temperaturi kapilární tepelnou trubicí ( $T_{tm} = 30\text{ °C}$ )



**Obr. 5.17** Teplotní pole formy v oblasti ocelové a měděné tvarové vložky při temperaturi kapilární tepelnou trubicí ( $T_{tm} = 45\text{ °C}$ )



**Obr. 5.18** Teplotní pole formy v oblasti ocelové a měděné tvarové vložky při teplotě kapilární tepelnou trubicí ( $T_{lm} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Z časového průběhu teplot ve sledovaných místech vstřikovací formy je patrné, že aplikace tepelné trubice způsobila zrovnomenění teplotních polí v oblasti přilehlé termočlánkům T4, T5 a T6, neboť u standardního systému chlazení vodou a přepážkovým systémem došlo alespoň v jednom místě z oblastí T4, T5 a T6 (ve srovnání se zbylými dvěma místy) k určitému odchýlení, na rozdíl od tepelné trubice. V celkovém pohledu však aplikace tepelné trubice pro chlazení ocelové vložky homogenitu teplotního pole formy zhoršuje. V případě konvenčního způsobu chlazení vodou a teplotě temperačního média  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  je rozdíl teplot ve sledovaných místech formy  $\Delta T = 1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , zatímco v případě aplikace tepelné trubice je tento rozdíl  $\Delta T = 2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  (zvýšení ca. o 26 %). Při teplotě temperace  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  je zaznamenáno v homogenitě teplotního pole formy ještě vyšších rozdílů (ca. 40 %). Je-li však ocelová vložka nahrazena slitinou na bázi mědi (Ampcoloy 940) je míra homogenity teplotního pole ve sledovaných místech vstřikovací formy více méně srovnatelná s konvenčním způsobem chlazení vodou v ocelové vložce. V případě formy s tvarovou vložkou ze slitiny Ampcoloy 940 a způsobu temperace vodou nebo tepelnou trubicí jsou při vzájemném porovnání teplotních polí závěry shodné jako u případu ocelové vložky. I v tomto případě došlo aplikací tepelné trubice k zvýšení nehomogenity teplotního pole ve formě. Tato skutečnost je ovlivněna funkcí tepelné trubice, kdy z její výparné části (k této části jsou blíže termočlánky s pozicí T4, T5 a T6) je teplo postupně odváděno

do části kondenzační, kde dochází k přenosu tepla do okolí, resp. do hlavního temperačního kanálu v upínací desce pohyblivé části formy s cirkulující vodou, viz obr. 4.6 (*k této části mají naopak blíže termočlánky T1, T2 a T3*). Pro zhodnocení homogenity teplotních polí na povrchu výstřiku by tedy pro tento případ temperace tepelnou trubicí bylo nutné měřit časový záznam teplot přímo v tvarové dutině formy, například použitím infračervených čidel začleněných do konstrukce tvarových částí formy již ve fázi její výroby.

Ze zaznamenaných časových závislostí teplot ve sledovaných místech vstřikovací formy je dále zřejmé, že střed teplotního pole, vymezený maximální a minimální teplotou, leží v případě tepelné trubice vždy výše nad teplotou temperace (*resp. temperačního média*) a výše než střed teplotního pole ustaveného konvenčním způsobem chlazení. Skutečnost, že teplota temperačního média je vždy nižší, než teplota v oblasti ustavené tepelnou trubicí, koresponduje se závěrem uvedeným pod odkazem [133], kde se uvádí, že teplota ustavená tepelnou trubicí v oblasti přilehlé výparné části trubice je vyšší, než teplota v oblasti přilehlé části kondenzační. Dále byl ve sledovaných místech vstřikovací formy zaznamenán s rostoucí teplotou temperace snižující se rozdíl mezi teplotou temperačního média a nejvyšší zaznamenanou teplotou formy (*viz obr. 5.16 až obr. 5.18*), rovněž ve shodě se závěry uvedenými pod odkazem [133].

## 6 SLEDOVÁNÍ MORFOLOGIE VÝSTŘIKŮ

Vzhledem k rešeršním poznatkům a významu tepelných dějů při zpracování semi-krytalických polymerů ve vztahu k jejich nadmolekulární struktuře (*zejména ve fázi chlazení*) bylo cílem této části disertační práce sledování a zhodnocení vlivu podmínek teploty vstřikovací formy (*konvenčními i nekonvenčními temperačními prostředky*) na morfologii polypropylenových výstřiků, resp. na jejich výsledný obsah krystalického podílu ve struktuře a případnou strukturní heterogenitu (*viz kap. 3.1.2*).

### 6.1 Analýza obsahu krystalického podílu ve struktuře výstřiků

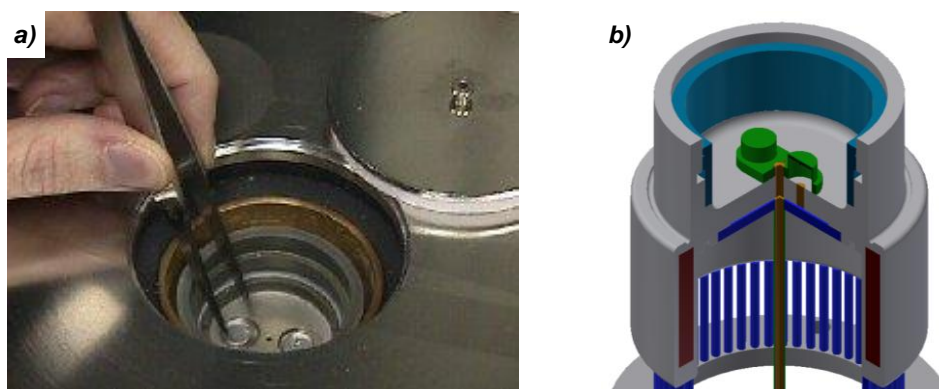
Z teoretických poznatků lze předpokládat, že s rostoucí teplotou formy se krystalický podíl ve struktuře materiálu (*stupeň krystalinity*) bude obecně zvyšovat, je však otázkou, jak bude ovlivněn změnou temperačního prostředí, geometrického faktoru temperačních kanálů a tepelné vodivosti materiálu tvarové vložky vstřikovací formy. Obsah krystalického podílu ve struktuře výstřiků (*v závislosti na způsobu a podmínkách teploty vstřikovací formy*) byl hodnocen pomocí metod diferenční snímání kalorimetrie (DSC) a širokoúhlé difrakce záření X (WAXS), jejichž podstata byla uvedena v kap. 3.3.3 a kap. 3.3.1. Cílem obou metod je prokázat, popřípadě vyloučit vliv způsobu teploty vstřikovací formy na obsah krystalického podílu ve struktuře polypropylenových výstřiků.

#### 6.1.1 Aplikace metody diferenční snímání kalorimetrie (DSC)

Studium obsahu krystalického podílu metodou diferenční snímání kalorimetrie bylo provedeno na přístroji DSC 6 PerkinElmer s připojeným chladicím agregátem Minichiller CC (*rozlišení DSC senzoru: 0,6  $\mu W$* ). Kalorimetr se skládá z měřicí cely a dvou platforem, které mají vlastní zdroj tepla (*viz obr. 6.1*). Na jednu z platforem byl vložen zkoumaný vzorek zalisovaný v hliníkové pánvičce s plochým dnem a víčkem (*minimalizující tepelný spád tepelné kapacity*) a na druhou teplotně inertní standard. Při DSC analýze polymerních materiálů je teplotně inertním standardem vzduch, resp. prázdná zalisovaná pánvička. Měřicí celi kalorimetru byla od okolí tepelně odizolována pláštěm, umožňující ohřev a chlazení vzorků v prostředí plynného dusíku za konstantního tlaku, čímž se zamezí oxidativní degradaci polymeru a usnadní odvod plynných produktů včetně vlhkosti materiálu.

Při DSC analýze se pracuje se vzorky o malé hmotnosti, aby byla zaručena přesnost měření. Optimální hmotnost připravovaných vzorků, která se odvíjí vždy od očekávaného tepelného efektu, je doporučována v rozmezí 4 až 12 mg [16] a závisí na rozlišení senzoru a typu zařízení. V rámci experimentálního výzkumu byly z průřezu rovinného dna

výstřiku odebrány vzorky vždy ze shodného místa v jeho středu o hmotnosti ( $10 \pm 0,2$ ) mg tak, aby obsahovaly povrchovou, smykovou i středovou vrstvu (viz kap. 3.1.2). Způsob přípravy vzorků eliminuje vliv nehomogenity vlastností výstřiku a tolerance jejich hmotnosti respektuje skutečnost, že větší odchylky hmotnosti vzorků by výsledky zatížily systematickou chybou, neboť jak bylo uvedeno v kap. 3.3.3, je hmotnost vzorků jedním z metodických faktorů, ovlivňujících výsledky měření. Vzorky byly váženy pomocí laboratorních torzních vah Techniprot s přesností 0,05 mg.



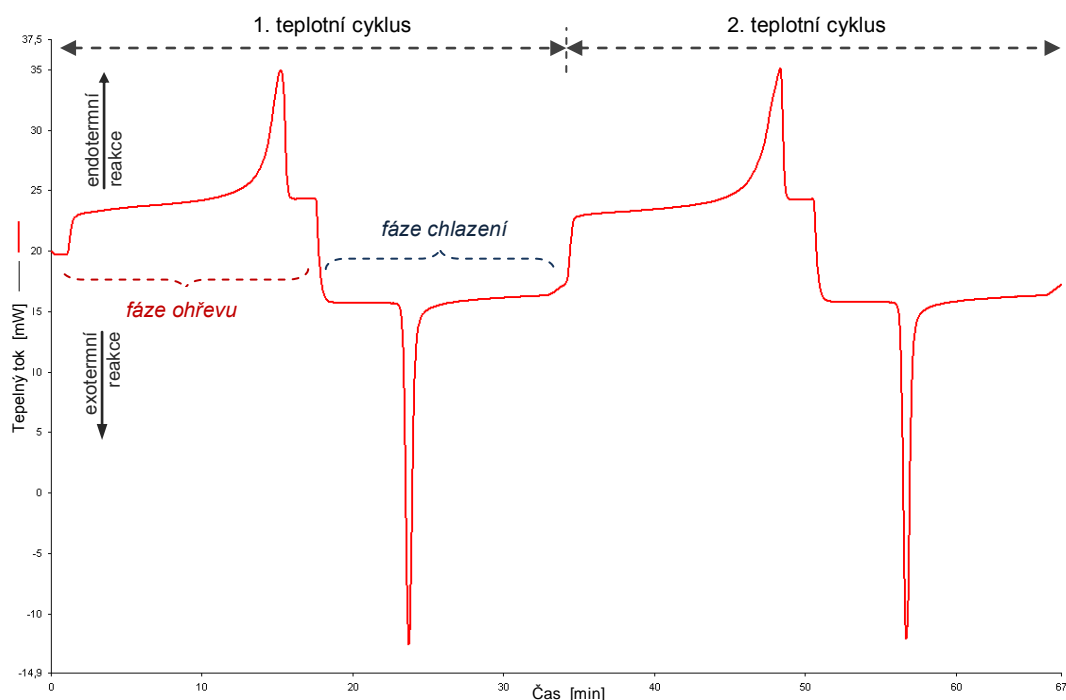
**Obr. 6.1** DSC kalorimetr PerkinElmer s detailem (a) a modelem (b) měřící cely

V souladu s ČSN EN ISO 11357-1 jsou v technické praxi studované vzorky vystaveny dvěma teplotním cyklům (viz obr. 6.2) [134]. Výsledky prvního cyklu odráží výchozí stav vzorku, který je ovlivněn tepelnou historií při jeho zpracování a provádí se do roztavení polymeru, kdy materiál dosáhne rovnovážného stavu. Druhé měření (*druhý teplotní cyklus*) se provádí po ochlazení vzorku, kdy došlo k odstranění tepelné historie polymeru v důsledku jeho zpracování ve finální výrobek a umožňuje tak skutečnou charakterizaci fyzikálních vlastností materiálu. S ohledem na cíle disertační práce (vymezené v kap. 1.2) byly v rámci experimentálního výzkumu vystaveny studované vzorky pouze jednomu, prvnímu teplotnímu cyklu, který odráží zpracovatelské podmínky a umožňuje hodnotit vlastní zpracovatelský proces, resp. vliv způsobu temperace vstřikovací formy na krystalinitu výstřiků (*sledováním změny entalpie tání, která je přímo úměrná změně stupně krystalinity*).

Zalisovaný zkušební vzorek v hliníkové pánvičce (tloušťky 0,1 mm) a teplotně inertní standard byly vloženy na platformy měřící cely, které byly zahřívány a chlazeny vzájemně nezávislými topnými elementy dle nastaveného teplotního programu (viz tab. 6.1) tak, aby jejich teplota stoupala, resp. po roztavení klesala konstantní rychlostí. Teplota vzorků byla měřena pomocí termočlánků umístěných pod oběma platformami. Po uzavření měřící cely a topného bloku byl zajištěn přívod dusíku z tlakové lahve pomocí regulačního ventilu,



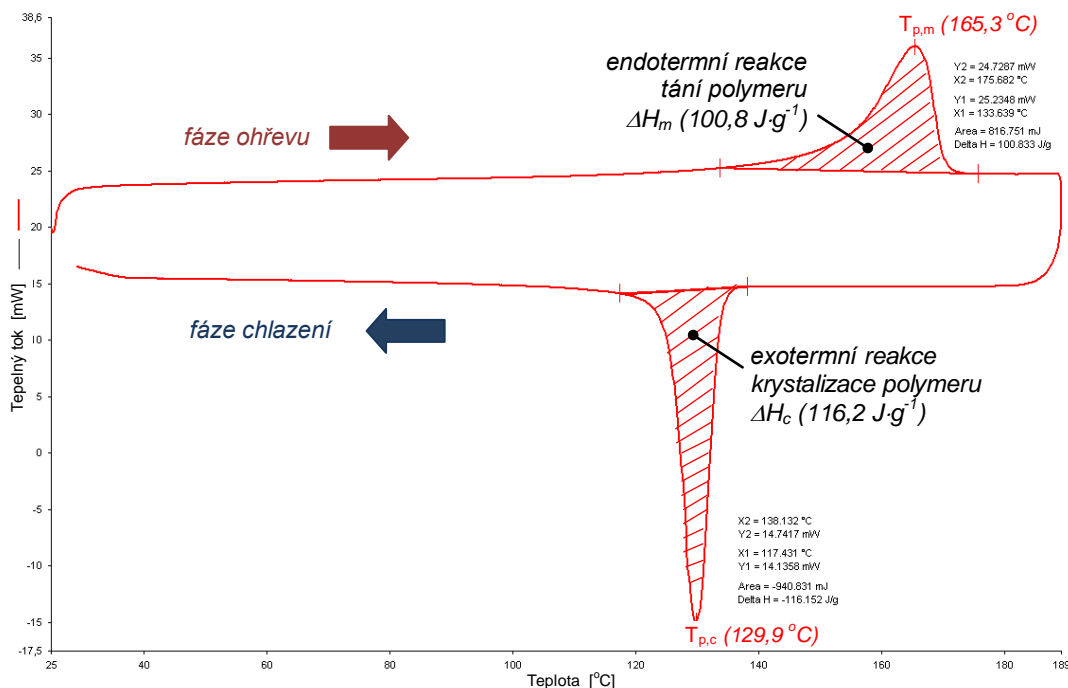
který cirkuloval kolem měřící cely. Při měření kalorimetr automaticky reguloval tepelný příkon do měřící cely, aby se udržela konstantní, předem zvolená rychlost ohřevu, resp. chlazení, a aby byl teplotní rozdíl mezi platformami nulový (viz podstata DSC metody, kap. 3.3.3). Výsledkem je tzv. DSC termogram, tedy teplotní, popřípadě časová závislost difference tepelných příkonů mezi zkoumaným vzorkem a standardem, zaznamenaný softwarem PE Pyris Series (viz příklad na obr. 6.2 a obr. 6.3).



**Obr. 6.2** DSC termogram pro PP výstřik Mosten MT 230 (časová závislost): dva teplotní cykly

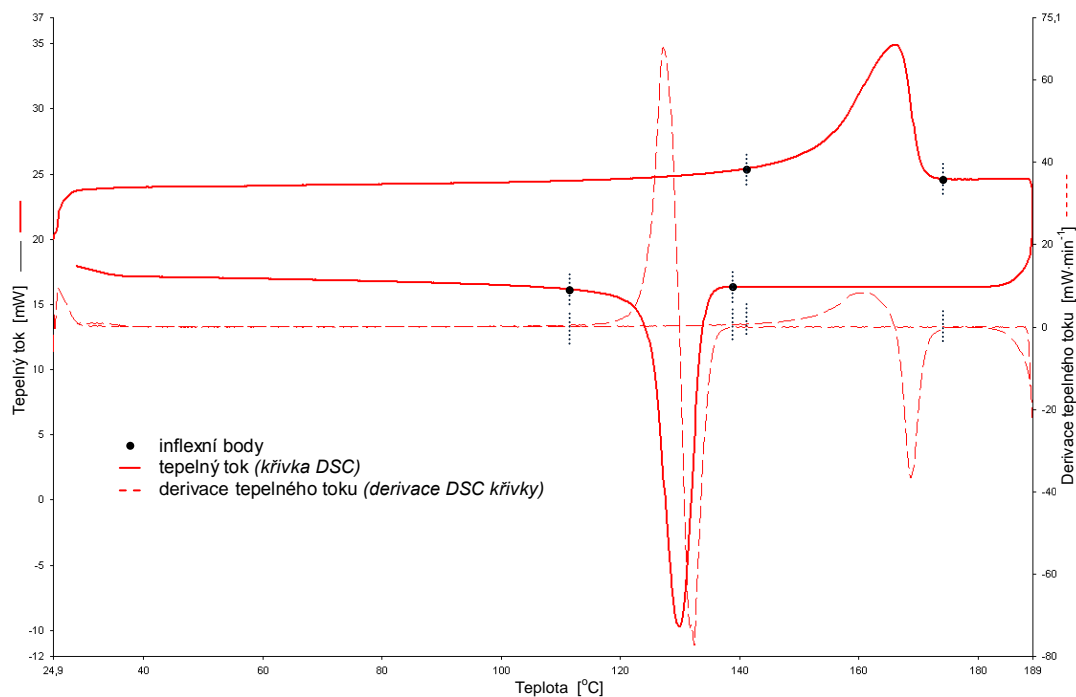
**Tab. 6.1** Teplotní program při DSC analýze

Izotermní ohřev (temperace vzorku)	25 °C po dobu 1 min
Proplachovací plyn	dusík ( $20 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ )
<b>Fáze ohřevu</b>	
Počáteční teplota	25 °C
Konečná teplota	190 °C
Rychlost ohřevu	lineární; $10 \text{ °C} \cdot \text{min}^{-1}$
<b>Fáze chlazení</b>	
Počáteční teplota	190 °C
Konečná teplota	25 °C
Rychlost ohřevu	lineární; $10 \text{ °C} \cdot \text{min}^{-1}$



**Obr. 6.3** DSC termogram pro PP výstřik Mosten MT 230 ( $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ), standardní konvenční teploty ocelové tvarové vložky ( $T_{tm} = 60^{\circ}\text{C}$ )

Při ohřevu zkoumaného vzorku zaostává jeho teplota za teplotou standardu a do zkoumaného vzorku je dodáváno více energie, aby došlo k vyrovnání teplot mezi vzorky (*endotermní děj*). Při ochlazování taveniny polymeru je naopak teplota zkoumaného vzorku vyšší než v standardu, a proto je do vzorku dodáváno méně energie, aby došlo k vyrovnání teplot (*exotermní děj*). Vzhledem ke skutečnosti, že polypropylen má teplotu skelného přechodu ( $T_g$ ) pod bodem mrazu, lze z DSC termogramu ve fázi ohřevu stanovit pouze teplotu tání ( $T_{p,m}$ ), která je obvykle definována jako teplota, při níž je v rovnováze poslední krystal a tavenina (*tomu odpovídá teplota vrcholu maxima*). Pomocí plochy úměrné teplotě tání se zjistí hodnota změny entalpie tání ( $\Delta H_m$ ) a to tak, že se integruje křivka píku tání (*termogramu*), ohraničená inflexními body teplot, při nichž začíná a končí tání zkoumaného vzorku. Inflexní body počátku a konce tání polypropyleny (*viz obr. 6.4*) byly definovány na základě první derivace DSC křivky, která detekuje změny měřeného signálu, tedy i fázových přeměn materiálu. Hodnota entalpie tání zkoušeného vzorku polypropyleny je přímo úměrná obsahu krystalického podílu v jeho struktuře a v případě znalosti entalpie tání plně krystalického izotaktického polypropyleny ( $\sim 209 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ ) lze z rovnice (3.15) získat stupeň krystalinity materiálu (*viz kap. 3.3.3*).



**Obr. 6.4** DSC termogram s inflexními body počátku a konce teploty tání, resp. krystalizace a první derivace DSC křivky

Při rychlém ochlazení polymeru (*během procesu jeho zpracování*) je možné při DSC analýze vzorku ve fázi ohřevu (*zejména u polymerů PET a PLA*) zachytit nežádoucí exotermní reakci v důsledku sekundární (*tzv. studené*) krystalizace, která však u použitých polypropylenových vzorků, zhotovených vstřikováním za různých metod temperace vstřikovací formy, viditelně nenastala.

Rovněž z fáze ochlazení taveniny studovaného vzorku lze v rámci DSC analýzy obdobným způsobem zaznamenat a vyhodnotit průběh primární krystalizace materiálu při teplotě ( $T_{p,c}$ ). Teplota i výsledná hodnota změny krystalizační entalpie ( $\Delta H_c$ ) jsou odrazem chemického složení, molekulové struktury, fyzikálního stavu materiálu a rychlosti chlazení taveniny v kalorimetru, nikoliv způsobu jeho chlazení při zpracování ve finální výrobek a z tohoto důvodu nejsou dále v rámci řešení disertační práce diskutovány, neboť nabývají ze shora uvedených důvodů vždy stejných hodnot.

Grafické záznamy z DSC měření (*termogramy*) jsou pro jednotlivé podmínky a způsoby temperace uvedeny v příloze 5. Hodnoty fázových přeměn v oblasti tání polymeru (*teploty i entalpie*), vyhodnocené z uvedených termogramů, jsou shrnuty v tab. 6.2. Termogramy polypropylenových výstřiků a hodnoty fázových přeměn nevykazují žádné významné (*prokazatelné*) rozdíly v závislosti na způsobu temperace tvarové vložky tvárníku vstřikovací formy. Vzniklé odchylky jsou pod statistickou hranicí významnosti a mohou být ovlivněny přesností stanovení inflexních bodů počátku a konce fázové přeměny tání, ho-

mogenitou vzorku, apod. Proto bylo přistoupeno k hodnocení obsahu krystalického podílu ve struktuře polypropylenu také metodou širokoúhlé difrakce záření X (viz kap. 6.1.2).

**Tab. 6.2** Fázové přeměny výstřiků Mosten MT 230 v závislosti na způsobu temperace tvárníku

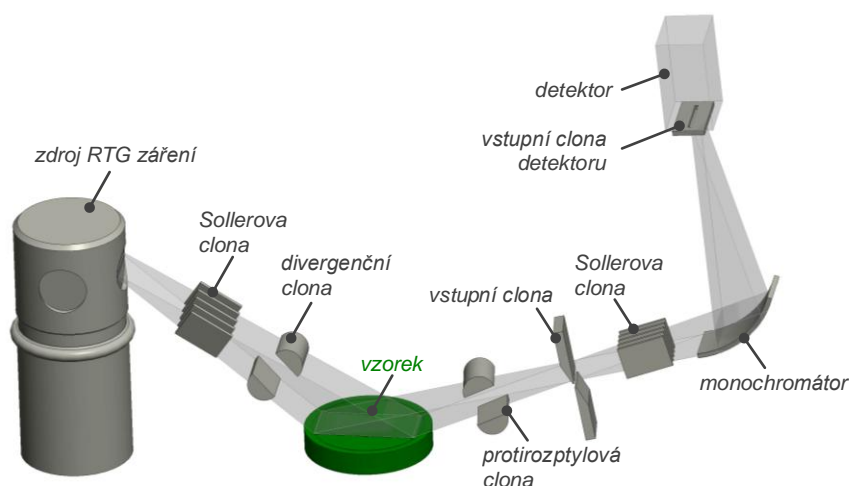
Vlastnost	$T_{tm}$ [°C]	Způsob temperace / materiál tvarové vložky tvárníku					
		Konvenční temperace			Konformní chlazení	Tepelná trubice	
		Ocel	Moldmax HH	Ampcoloy 940		Ocel	Ampcoloy 940
$T_{p,m}$ [°C]	30	166	166	166	167	166	165
	45	165	166	165	167	165	165
	60	165	166	165	166	165	165
$\Delta H_m$ [J·g <sup>-1</sup> ]	30	97,0	99,0	100,2	101,3	97,9	96,7
	45	98,1	98,2	99,2	99,1	97,8	99,9
	60	100,8	95,9	101,2	102,8	103,1	105,3

### 6.1.2 Aplikace metody širokoúhlé difrakce záření X (WAXS)

Vzhledem k závěrům DSC analýzy, faktorům ovlivňující přesnost interpretace získaných výsledků a způsobu stanovení inflexních bodů počátku a konce fázové přeměny tání polypropylenových vzorků, za účelem stanovení hodnot změny entalpie tání ( $\Delta H_m$ ), jejichž velikost je přímo úměrná obsahu krystalického podílu ve struktuře polymeru, bylo v rámci experimentálního výzkumu přistoupeno k ověření získaných poznatků o obsahu krystalického podílu ve struktuře výstřiku k měření "tétož" metodou širokoúhlé difrakce záření X. Podstata metody a způsob stanovení stupně krystalinity z integrální intenzity rozptylu záření na krystalické a amorfní složce byly uvedeny v kap. 3.3.1.

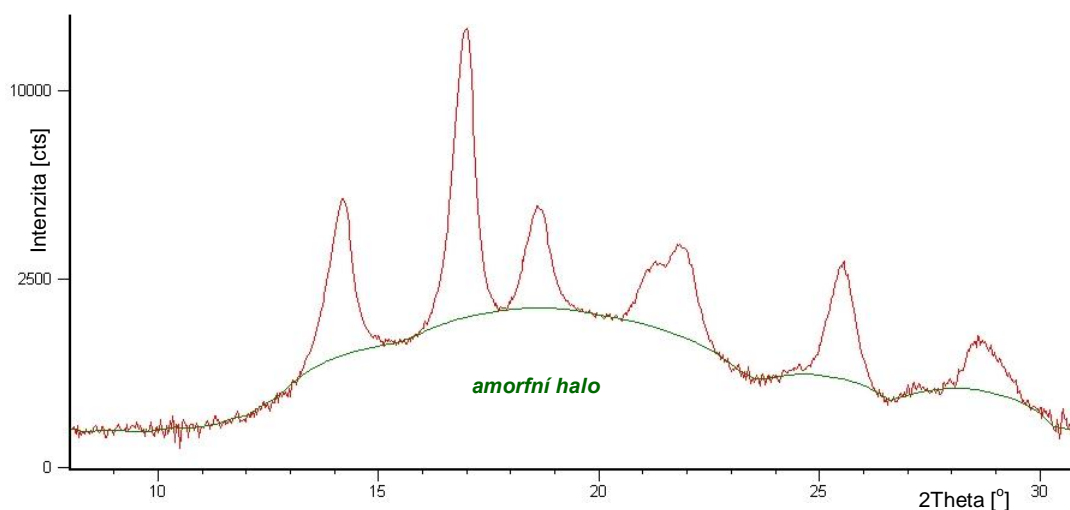
Experimentální měření radiálního rozložení intenzity rozptýleného záření X jako funkce úhlu pro jednotlivé výstřiky polypropylenu (v závislosti na způsobu a podmínkách temperace vstřikovací formy) bylo realizováno ve spolupráci s Ústavem inženýrství polymerů při univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně. Měření bylo provedeno na výstřiku v místě jeho dna pomocí práškového difraktometru PANalytical X'Pert PRO s vertikálním goniometrem theta-theta (vzorek byl nastaven ve fixní poloze). Difraktometr byl osazen rentgenovou lampou s měděnou anodou, vytvářející svazek rentgenového záření Cu K $\alpha$  o vlnové délce 0,1541 nm a ultra-rychlým polovodičovým detektorem PIXcel, registrující difraktované záření s vysokou rozlišovací schopností (viz obr. 6.5). Zařízení pracuje na principu Bragg-Brentanova parafokusujícího uspořádání s automatickou divergenční a protirozptylovou

clonou. V případě tohoto typu geometrie se rentgenová lampa a detektor pohybují vždy po jedné kružnici, odpovídající průměru goniometru (*detektor i rentgenová lampa se otáčí stejnými rychlostmi v opačných směrech*). Povrch plochého vzorku (*dno výstřiku*) byl umístěn tangenciálně vzhledem ke středu kružnice a dotýkal se osy kružnice goniometru. Povrch vzorku byl zároveň v tangenciální poloze vzhledem k takzvané fokusační kružnici (*jeho normálový vektor pólí úhel mezi zdrojem rentgenového záření a detektorem*), po jejímž obvodu se současně pohybuje fokusační štěrba rentgenové lampy, vymezující primární svazek rentgenového záření a vstupní štěrba detektoru (*odpovídá fokusační podmínce, resp. para-fokusačnímu efektu rovinných vzorků*). Nastavení clon bylo v hodnotách  $8^\circ$  až  $30^\circ$  ( $2\theta$ ) s krokem  $0,026^\circ$ . Doba snímání při každém kroku činila 37,74 s.



**Obr. 6.5** Práškový difraktometr PANalytical X'Pert PRO a schéma Bragg-Brentanova uspořádání

Difraktogramy, včetně tabulkového vyhodnocení spekter pro jednotlivé polypropylenové výstřiky (v závislosti na způsobu a podmínkách temperace vstřikovací formy), tj. jejich přesná pozice píku, intenzita a velikost plochy, jsou uvedeny v příloze 6. Vyhodnocení krystalického podílu bylo provedeno pomocí software PANalytical X'Pert a to na základě stanovení integrální intenzity rozptylu záření na krystalické a amorfní složce (viz rovnice 3.7), resp. plochy krystalické fáze nad amorfním halo a plochy amorfního halo (viz příklad na obr. 6.6). Před určením krystalinity byly difraktogramy srovnány, aby se odstranilo pozadí. Výsledné hodnoty stupně krystalinity jsou uvedeny v tab. 6.3 v závislosti na způsobu a podmínkách temperace tvarové vložky vstřikovací formy. Získané výsledky nevykazují výrazných změn v obsahu krystalického podílu ve struktuře výstřiků v závislosti na jejich podmínkách chlazení.



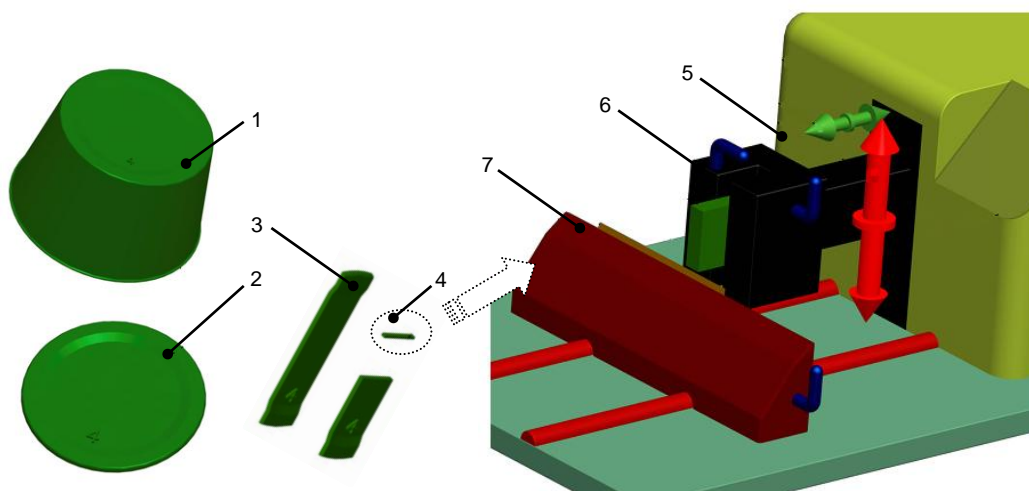
**Obr. 6.6** Difraktogram (XRD spektrum) PP výstřiku Mosten MT 230, konformní chlazení ocelové tvarové vložky ( $T_{tm} = 30\text{ °C}$ )

**Tab. 6.3** Stupeň krystalinity výstřiků Mosten MT 230 v závislosti na způsobu temperace tvárníku

Vlastnost	$T_{tm}$ [°C]	Způsob temperace / materiál tvarové vložky tvárníku					
		Konvenční temperace			Konformní chlazení	Tepelná trubice	
		Ocel	Moldmax HH	Ampcoloy 940		Ocel	Ampcoloy 940
$\chi_c$ [%]	30	47,3	47,1	47,6	46,8	47,8	48,2
	45	47,1	47,2	47,7	46,6	47,7	48,1
	60	47,8	48,5	48,5	48,0	47,4	49,1

## 6.2 Mikroskopické studium struktury výstřiků

Přímé zobrazení a analýza vnitřní struktury povrchu a vnitřku polypropylenových výstřiků - viz kap. 3.1.2 (*v závislosti na způsobu a podmínkách temperace vstřikovací formy*) bylo provedeno pomocí světelné mikroskopie s polarizačními filtry ve spolupráci s Ústavem makromolekulární chemie Akademie věd České republiky, v.v.i. (viz kap. 3.3.2).



**Obr. 6.7** Příprava vzorků a tenkých řezů pro mikroskopii

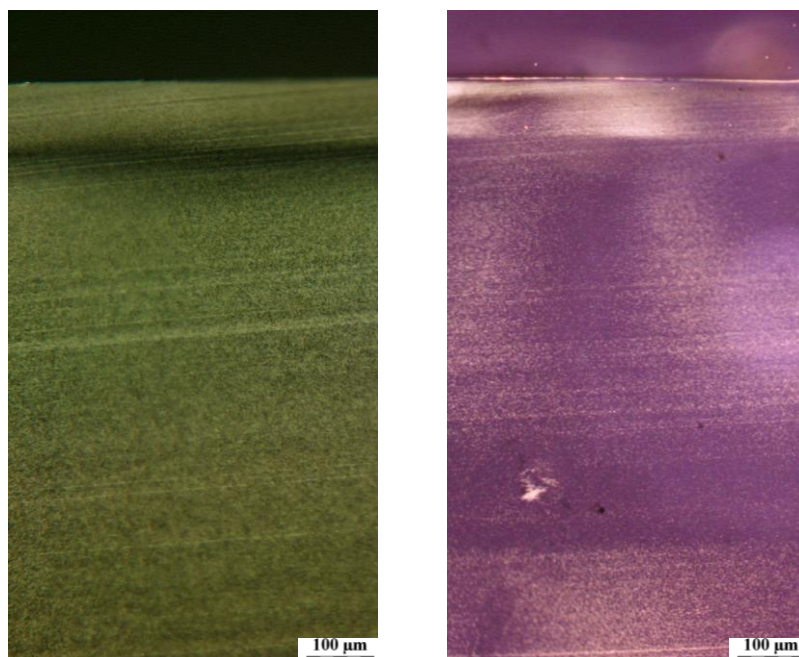
1- výstřík, 2- rovinné dno výstříku, 3- vystřížený vzorek z dna výstříku, 4- preparát (tenký řez)  
5- mikrotom, 6- svorky pro upnutí vzorku, 7- držák čepele/nože

Pro mikroskopické pozorování byly řezáním tuhého vzorku na rotačním mikrotomu Leica RM 2155 připraveny preparáty (*tenké řezy*) o tloušťce  $8\text{ }\mu\text{m}$  (*pomocí mikrotomových žiletek*). Tuhé vzorky byly odebrány ze dna výstřiků střížným nástrojem ve směru toku taveniny, následně byly tyto lupénkovou pilou v polovině rozděleny a upnuty do svorek mikrotomu pro přípravu tenkých řezů (viz obr. 6.7). Tenké řezy (*připravené ve směru kolmém k tečení taveniny*) byly narovnány na podložní sklíčka do kapky imerzního oleje pro mikroskopii (*označení 518 C*) podle DIN 58 884, resp. DIN ISO 8036/1 (*s vysokou hodnotou indexu lomu 1,518*). Dále byly přikryty krycím sklíčkem a vloženy pod objektivy světelného mikroskopu tak, aby byl zobrazen nejprve náhled řezu (*pod objektivem 10 a projekтивní čočkou 0,6*) a následně snímky, které zachycují vždy stranu průřezu tloušťky přilehlou k ploše tvarové vložky tvárníku, zhotovené z materiálu rozdílné tepelné vodivosti, temperované různými temperačními prostředky a s chladícími kanály odlišného geometrického faktoru. K tomuto pozorování byly postupně použity objektivy 10, 25 a 40 (*s projekтивní čočkou 0,6*), umožňující zvětšení obrazu 100x, 250x a 400x (*zvětšení mikroskopu je ná-*



*sobkem zvětšení objektivu a okuláru*). Přidáním imerzního oleje mezi tenký řez a objektiv mikroskopu (*s vyšším indexem lomu, než má vzduch*) byla zvýšena jeho rozlišovací schopnost, neboť imerzní olej předchází ztrátám světla, které se láme na rozhraní preparátu a prostředí (*do objektivu tak dopadne větší množství paprsků*).

V rámci mikroskopického studia morfologie výstřiků světelnou mikroskopií bylo pro danou teplotu temperačního média tvarové vložky vstřikovací formy zhotoveno min. 6 preparátů v závislosti na způsobu temperace vložky. Pro všechny tři teploty temperace formy tak bylo připraveno min. 18 preparátů, umožňující jejich strukturní analýzu pod objektivu mikroskopu (*ve skutečnosti jich pro každý stav bylo připraveno mnohem více*). Na základě mikroskopické analýzy nelze kvalifikovaně konstatovat nic jiného, než že vzorky nevykazují identifikovatelné rozdíly mezi texturami povrchu a jádra vzorku, resp. jasně rozpoznatelné hranice mezi celkovou povrchovou vrstvou a středovou vrstvou (*sférolitickým jádrem*), viz obr. 6.8.

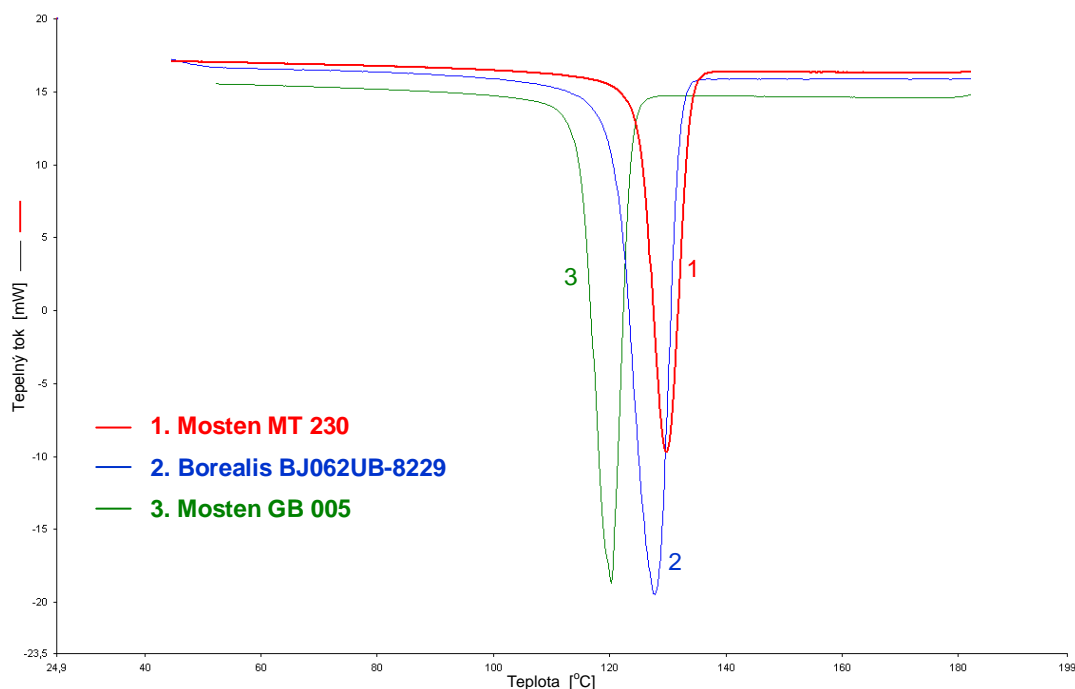


**Obr. 6.8** Mikrotomové řezy výstřiku PP Mosten MT 230 (SM)

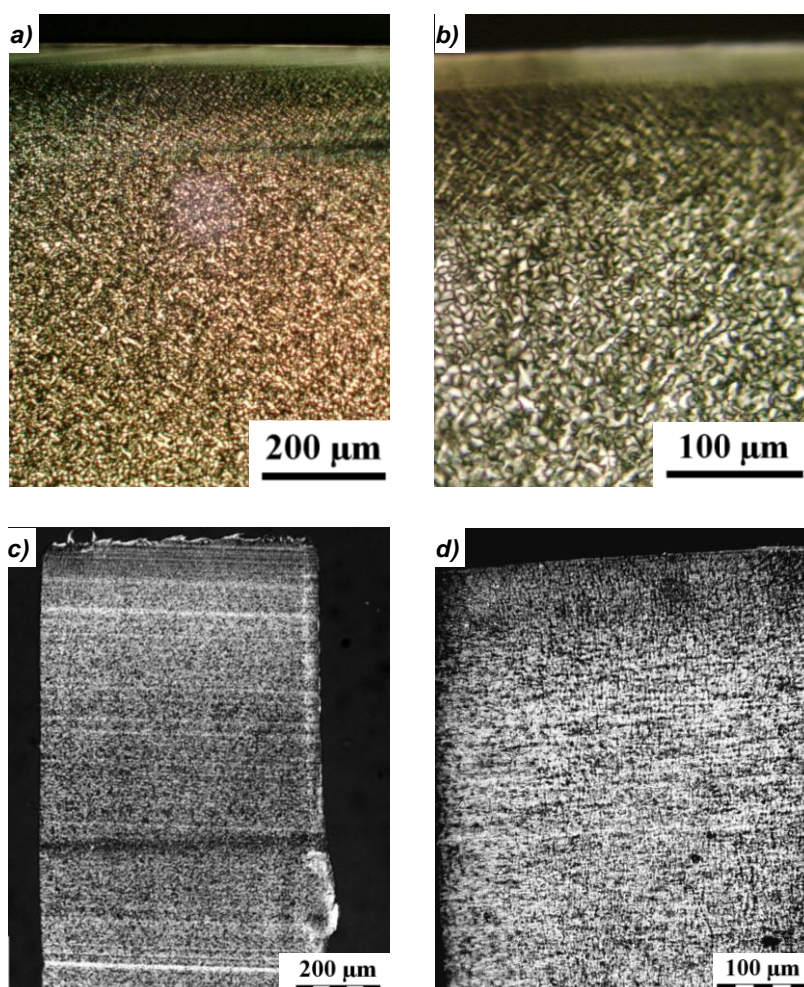
Charakter středové vrstvy výstřiku, ale také hranice mezi celkovou povrchovou a středovou vrstvou jsou ovlivněny účinkem cizorodé příměsi v polypropyleny - nukleanty. Toto konstatování je podpořeno experimentálně stanovenou hodnotou teploty krystalizace pomocí metody diferenční snímání kalorimetrie (*viz např. obr. 6.3 nebo příloha 5*). Na základě této metody lze při studiu fázové přeměny materiálu ve fázi chlazení taveniny konstatovat, že v případě polypropyleny Mosten MT 230 byl počátek teplotního intervalu krys-



talizace detekován při teplotě ca. 138 °C a konec krystalizační přeměny při teplotě odpovídající ca. 117 °C. Střední hodnota teploty krystalizace, stanovená z vrcholu píku exotermické reakce ve fázi chlazení, odpovídá ca. 130 °C. Homopolymery polypropylenů bez nukleačních činidel však zpravidla krystalizují při střední hodnotě teploty krystalizace ca.  $(110 \div 120)$  °C v závislosti na molekulární struktuře a rychlosti ochlazování (*např. střední teplota krystalizace homopolypropylenů Mosten GB 005 odpovídá teplotě 120 °C, viz obr. 6.9 a krystalická struktura výstřiku s viditelnou povrchovou i středovou vrstvou, která je tvořena sférolity, je uvedena na obr. 6.10a,b*). Tato skutečnost potvrzuje přítomnost nukleantů v polypropylenu Mosten MT 230, které působí jako nukleační centra, tzn. jako heterogenní zárodky krystalizace, urychlující vznik krystalických oblastí. Výsledkem jsou velmi malé krystalické objekty, které jsou spíše než sférolity označovány jako hedrity a mikrotomové řezy výstřiků nevykazují viditelný přechod mezi jejich povrchovou a středovou vrstvou, resp. jejich strukturní rozdíly. Tato skutečnost výrazným způsobem ovlivnila zamýšlené studium strukturní heterogenity výstřiku v závislosti na způsobu a podmínkách temperace tvarové vložky vstřikovací formy. Přítomnost nukleačních činidel potvrzuje také spektrální analýza polypropylenů (*viz kap. 4.2*), poukazující na přítomnost karboxylové skupiny (COOH).



**Obr. 6.9** DSC termogram - exotermní reakce ( $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ )  
pro PP Mosten MT 230, PP Borealis BJ062UB-8229 a PP Mosten GB 005



**Obr. 6.10** Krystalická struktura výstřiků z polypropylenů (SM)

(a, b) Mosten GB 005; (c, d) Borealis BJ062UB-8229

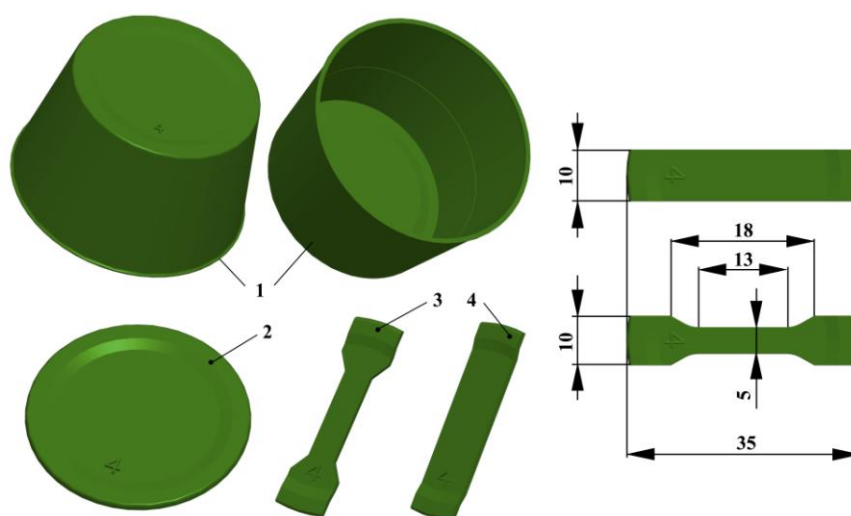
Ve vztahu k uvedeným poznatkům bylo snahou nahradit PP Mosten MT 230 polypropylenem, který by neobsahoval cizorodé příměsi (*nukleanty*), umožnil kvalitní výrobu vstřikovaných dílů a zřetelné mikroskopické zobrazení heterogenní struktury výstřiku s rozdíly mezi texturami povrchu a vnitřku vzorku (*v závislosti na způsobu a podmínkách temperace tvarové vložky*). K tomuto záměru bylo použito několik typů polypropylenů, např. PP Mosten GB 005, PP Borealis BJ062UB-8229, apod., vždy však s nevyhovujícími výsledky. Například Mosten GB 005 velmi dobře vyhovuje podmínkám mikroskopického studia struktury výstřiků (*viz obr. 6.10a,b - mikrotomový řez zhotoven z víceúčelového zk. tělesa, viz ISO 3167*), ale tokové vlastnosti taveniny ( $MFR_{(230; 2,16)} = 5 \text{ g} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$ ) neumožnily jeho použití pro vstřikování do formy popsané v kap. 4.1.1 (*s ohledem na její násobnost a konstrukci vtokové soustavy*). Naopak u nízkoviskózního polypropylenů Borealis BJ062UB-8229 jsou splněny tokové podmínky, umožňující jeho vstřikování do uvedené

formy ( $MFR_{(230; 2, 16)} = 120 \text{ g} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$ ), avšak mikroskopické studium heterogenní struktury výstřiku (*v závislosti na způsobu a podmínkách temperace formy*) je vzhledem k jeho jemné struktuře ve středové vrstvě a nejasné hranici mezi texturami povrchu a vnitřku vzorku „vyloučeno“ (*viz obr. 6.10c,d*), obdobně jako u polypropylenu Mosten MT 230. Vzhledem k DSC termogramu pro tento polypropylen, resp. střední hodnotě teploty krystalizace ca. 125 °C je pravděpodobnou příčinou opět přidavek nukleantů (*resp. cizorodých částic*), který je v technické praxi velmi běžný.

V rámci vynaloženého úsilí se s ohledem na konstrukci vstřikovací formy, zejména její násobnost, geometrii ústí vtoku a tokových kanálů (*tunelový vtok vyžaduje materiál s dostatečnou elasticitou*), nepodařilo nalézt polypropylen, který by vyhovoval podmínkám experimentálního výzkumu z hlediska požadovaných tokových vlastností taveniny a současně neobsahoval příměsi cizorodých látek, ovlivňující strukturu materiálu obdobně jako termodynamické podmínky chlazení taveniny. Vzhledem k této skutečnosti budou získané výsledky vztaženy a diskutovány pro průmyslově aplikované polypropyleny s nukleačními činidly, které jsou v praxi rozšířené.

## 7 SLEDOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ VÝSTŘIKŮ

Vzhledem k možným předpokladům vlivu temperačního prostředí na morfologii polymerních výstřiků byl sledován také vliv způsobu temperace tvarové vložky vstřikovací formy na konečné mechanické (*makroskopické*) vlastnosti polypropylenových výstřiků, které jsou vedle chemického složení, molekulární struktury a dalších faktorů výsledkem uspořádání makromolekul na nadmolekulární úrovni, resp. jejich morfologické struktury.



**Obr. 7.1** Příprava zkušebních těles pro stanovení mechanických vlastností výstřiků

1- výstřík, 2- rovinné dno výstříku, 3- zkušební těleso pro stanovení tahových vlastností,  
4- zkušební těleso pro stanovení ohybových vlastností

S ohledem na rozměry a geometrii výstřiků byly pro účely této práce hodnoceny jejich tahové a ohybové vlastnosti (*viz příloha 7*), které vychází z podstaty mezinárodních předpisů ČSN EN ISO 527-1/2 a ČSN EN ISO 178, avšak podmínky zkoušení se lišily v tvaru a rozměrech zkušebních těles, velikosti počáteční měřené délky nebo vzdálenosti podpěr, které odpovídaly možnostem dané konstrukcí výstříku [135-137]. Zkušební tělesa (*viz obr. 7.1*) byla vystřižena z rovinného dna výstříku (*o tloušťce ~1,3 mm*) ve směru toku taveniny střížným nástrojem, umístěným ve výstředníkovém lisu LENP 40 (*s ohledem na předpokládanou anizotropii vlastností výstřiků v důsledku orientace řetězců makromolekul při smykovém namáhání taveniny polymeru během procesu vstřikování a průběhu jejího ochlazování ve vstřikovací formě*). Mechanické vlastnosti výstříku ve směru orientace řetězců jsou dány tuhostí kovalentních vazeb a vazebních úhlů, zatímco ve směru kolmém k řetězcům jsou odrazem nižších Van der Waalsovských (*intermolekulárních*) sil. Příprava zkušebních těles smluvních tvarů vystřihováním (*resp. dle mezinárodní normy "vysekává-*

ním") odpovídá možnostem přípravy zkušebních těles dle předpisu ČSN EN ISO 527-2. Všechna zkušební tělesa byla po výrobě kondicionována [138] a následně zkoušena ve standardním prostředí 23/50 dle ČSN EN ISO 291. Při tahovém zatěžování byl tedy vzorek namáhán ve směru toku taveniny a v případě ohybového namáhání naopak ve směru kolmém na směr toku taveniny.

## 7.1 Tahové vlastnosti výstřiků v závislosti na způsobu temperace formy

Při stanovení tahových vlastností výstřiků na zařízení HOUNSFIELD H 10 KT s indikátorem síly do 500 N byla zkušební tělesa s počáteční měřenou délkou, která odpovídala upínací vzdálenosti mezi čelistmi 18 mm, protahována ve směru podélné osy konstantní rychlostí  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  až do okamžiku jejich porušení. Z průběhu grafické závislosti smluvního napětí na jmenovitém poměrném prodloužení byly s ohledem na reprodukovatelnost výsledků stanoveny hodnoty napětí na mezi kluzu, resp. mez pevnosti výstřiků ( $\sigma_m$ ) a jejich jmenovité poměrné prodloužení na mezi kluzu, resp. na mezi pevnosti ( $\varepsilon_{tm}$ ) v závislosti na tepelné vodivosti materiálu tvarové vložky, geometrickém faktoru temperačních kanálů a temperačním prostředkem (viz tab. 7.1 až tab. 7.3). Jmenovité poměrné prodloužení (*namísto poměrného prodloužení*) bylo použito s ohledem na geometrii zkušebních těles v souladu s předpisem ČSN EN ISO 527 a stanovilo se jako posun křížové hlavy od počátku zkoušky vzhledem k upínací vzdálenosti mezi čelistmi.

Výsledné hodnoty tahových vlastností výstřiků uvedené v tab. 7.1 až tab. 7.3 jsou vyjádřeny aritmetickým průměrem ( $\mu$ ) s mírou variability (*statistické disperse*) v podobě výběrové směrodatné odchylky ( $s_r$ ), včetně intervalu spolehlivosti ( $P$ ), v němž se s jistotou předem zadanou hodnotou pravděpodobnosti (95 %) nachází hodnota sledované veličiny.

**Tab. 7.1** Tahové vlastnosti výstřiků v závislosti na tepelné vodivosti materiálu tvarové vložky

Vlastnost	$T_{tm}$ [°C]	Konvenční přepážkový systém temperace								
		Ocelová vložka			Vložka Moldmax HH			Vložka Ampcoloy 940		
		$\mu$	$s_r$	$P(95 \%)$	$\mu$	$s_r$	$P(95 \%)$	$\mu$	$s_r$	$P(95 \%)$
$\sigma_m$ [MPa]	30	34,3	$\pm 0,3$	$\pm 0,2$	34,2	$\pm 0,4$	$\pm 0,3$	33,6	$\pm 0,4$	$\pm 0,3$
	45	34,7	$\pm 0,8$	$\pm 0,6$	34,3	$\pm 0,3$	$\pm 0,2$	33,8	$\pm 0,4$	$\pm 0,3$
	60	34,5	$\pm 0,4$	$\pm 0,3$	35,4	$\pm 0,3$	$\pm 0,2$	34,1	$\pm 0,3$	$\pm 0,2$
$\varepsilon_{tm}$ [%]	30	21,5	$\pm 1,2$	$\pm 0,9$	20,4	$\pm 0,5$	$\pm 0,4$	18,0	$\pm 0,8$	$\pm 0,6$
	45	21,7	$\pm 2,5$	$\pm 1,9$	19,6	$\pm 1,2$	$\pm 0,9$	20,6	$\pm 1,6$	$\pm 1,1$
	60	21,3	$\pm 1,8$	$\pm 1,3$	21,1	$\pm 1,2$	$\pm 0,9$	20,5	$\pm 1,5$	$\pm 1,1$

Poznámka:  $P(95 \%)$  - interval spolehlivosti je určen za předpokladu Studentova rozdělení ( $t$ -rozdělení)

**Tab. 7.2** Tahové vlastnosti výstřiků v závislosti na geometrickém faktoru temperačních kanálů

Vlastnost	$T_{tm}$ [°C]	Ocelová tvarová vložka					
		Konvenční temperace			Konformní chlazení		
		$\mu$	$s_r$	$P(95\%)$	$\mu$	$s_r$	$P(95\%)$
$\sigma_m$ [MPa]	30	34,3	$\pm 0,3$	$\pm 0,2$	33,8	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$
	45	34,7	$\pm 0,8$	$\pm 0,6$	34,0	$\pm 0,3$	$\pm 0,2$
	60	34,5	$\pm 0,4$	$\pm 0,3$	34,2	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$
$\varepsilon_{tm}$ [%]	30	21,5	$\pm 1,2$	$\pm 0,9$	20,3	$\pm 0,5$	$\pm 0,4$
	45	21,7	$\pm 2,5$	$\pm 1,9$	20,8	$\pm 0,7$	$\pm 0,5$
	60	21,3	$\pm 1,8$	$\pm 1,3$	21,0	$\pm 1,2$	$\pm 0,9$

Poznámka:  $P(95\%)$  - interval spolehlivosti je určen za předpokladu Studentova rozdělení (t-rozdělení)

**Tab. 7.3** Tahové vlastnosti výstřiků v závislosti na temperačním prostředí tvarové vložky

Vlastnost	$T_{tm}$ [°C]	Konvenční temperace			Tepelná trubice					
		Ocelová vložka			Ocelová vložka			Vložka Ampcoloy 940		
		$\mu$	$s_r$	$P(95\%)$	$\mu$	$s_r$	$P(95\%)$	$\mu$	$s_r$	$P(95\%)$
$\sigma_m$ [MPa]	30	34,3	$\pm 0,3$	$\pm 0,2$	34,5	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$	33,0	$\pm 0,4$	$\pm 0,3$
	45	34,7	$\pm 0,8$	$\pm 0,6$	34,7	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$	33,6	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$
	60	34,5	$\pm 0,4$	$\pm 0,3$	34,8	$\pm 0,4$	$\pm 0,3$	33,9	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$
$\varepsilon_{tm}$ [%]	30	21,5	$\pm 1,2$	$\pm 0,9$	20,7	$\pm 1,7$	$\pm 1,2$	19,5	$\pm 1,0$	$\pm 0,8$
	45	21,7	$\pm 2,5$	$\pm 1,9$	21,4	$\pm 1,3$	$\pm 0,9$	19,5	$\pm 1,5$	$\pm 1,1$
	60	21,3	$\pm 1,8$	$\pm 1,3$	19,6	$\pm 2,0$	$\pm 1,4$	19,7	$\pm 0,7$	$\pm 0,5$

Poznámka:  $P(95\%)$  - interval spolehlivosti je určen za předpokladu Studentova rozdělení (t-rozdělení)

## 7.2 Ohybové vlastnosti výstřiků v závislosti na způsobu temperace formy

Při stanovení ohybových vlastností na zařízení HOUNSFIELD H 10 KT s indikátorem síly do 500 N byla zkušební tělesa volně podepřena dvěma podpěrami ve vzdálenosti 26 mm a uprostřed zatěžována přítlakovým trnem konstantní rychlostí  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  do meze pevnosti v ohybu. Z průběhu grafické závislosti napětí na deformaci ohybem byly stanoveny hodnoty pevnosti v ohybu ( $\sigma_{tm}$ ) a modulu pružnosti v ohybu ( $E_t$ ), který byl vyjádřen v souladu s předpisem ČSN EN ISO 178 z hodnot napětí v ohybu a průhybu, odpovídající hodnotám deformace ohybem 0,05 % a 0,25 %, viz tab. 7.4 až tab. 7.6. Výsledné hodnoty ohybových vlastností výstřiků v závislosti na způsobu a podmínkách temperace tvarové vložky vstřikovací formy jsou vyjádřeny opět aritmetickým průměrem ( $\mu$ ) s mírou variability v podobě výběrové směrodatné odchylky ( $s_r$ ), včetně intervalu spolehlivosti ( $P$ ).





**Tab. 7.4** Ohybové vlastnosti výstřiků v závislosti na tepelné vodivosti materiálu tvarové vložky

Vlastnost	T <sub>tm</sub> [°C]	Konvenční přepážkový systém temperace								
		Ocelová vložka			Vložka Moldmax HH			Vložka Ampcoloy 940		
		$\mu$	$s_r$	P(95 %)	$\mu$	$s_r$	P(95 %)	$\mu$	$s_r$	P(95 %)
$\sigma_{fm}$ [MPa]	30	62,4	± 0,3	± 0,4	65,5	± 0,5	± 0,6	65,9	± 0,6	± 0,7
	45	68,9	± 2,0	± 2,5	66,9	± 2,6	± 3,2	68,5	± 0,8	± 1,0
	60	72,8	± 1,5	± 1,9	68,9	± 1,1	± 1,4	68,7	± 0,9	± 1,1
E <sub>f</sub> [%]	30	1549	± 37	± 46	1602	± 150	± 186	1664	± 122	± 152
	45	1617	± 28	± 35	1576	± 74	± 92	1578	± 144	± 179
	60	1633	± 67	± 83	1675	± 108	± 134	1751	± 61	± 76

Poznámka: P (95 %) - interval spolehlivosti je určen za předpokladu Studentova rozdělení (t-rozdělení)

**Tab. 7.5** Ohybové vlastnosti výstřiků v závislosti na geometrickém faktoru temperačních kanálů

Vlastnost	T <sub>tm</sub> [°C]	Ocelová tvarová vložka					
		Konvenční temperace			Konformní chlazení		
		$\mu$	$s_r$	P(95 %)	$\mu$	$s_r$	P(95 %)
$\sigma_{fm}$ [MPa]	30	62,4	± 0,3	± 0,4	62,2	± 0,2	± 0,2
	45	68,9	± 2,0	± 2,5	67,6	± 0,4	± 0,5
	60	72,8	± 1,5	± 1,9	70,7	± 0,7	± 0,9
E <sub>f</sub> [%]	30	1549	± 37	± 46	1417	± 33	± 41
	45	1617	± 28	± 35	1515	± 28	± 35
	60	1633	± 67	± 83	1558	± 33	± 41

Poznámka: P (95 %) - interval spolehlivosti je určen za předpokladu Studentova rozdělení (t-rozdělení)

**Tab. 7.6** Ohybové vlastnosti výstřiků v závislosti na temperačním prostředí tvarové vložky

Vlastnost	T <sub>tm</sub> [°C]	Konvenční temperace			Tepelná trubice					
		Ocelová vložka			Ocelová vložka			Vložka Ampcoloy 940		
		$\mu$	$s_r$	P(95 %)	$\mu$	$s_r$	P(95 %)	$\mu$	$s_r$	P(95 %)
$\sigma_{fm}$ [MPa]	30	62,4	± 0,3	± 0,4	64,7	± 0,7	± 0,9	66,1	± 0,8	± 1,0
	45	68,9	± 2,0	± 2,5	65,8	± 1,4	± 1,7	64,2	± 1,4	± 1,7
	60	72,8	± 1,5	± 1,9	73,5	± 0,4	± 0,5	65,7	± 0,7	± 0,9
E <sub>f</sub> [%]	30	1549	± 37	± 46	1616	± 63	± 78	1427	± 61	± 76
	45	1617	± 28	± 35	1670	± 40	± 50	1589	± 30	± 37
	60	1633	± 67	± 83	1760	± 57	± 71	1677	± 54	± 67

Poznámka: P (95 %) - interval spolehlivosti je určen za předpokladu Studentova rozdělení (t-rozdělení)

## 8 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Hlavním cílem disertační práce byl výzkum vlivu nekonvenčních způsobů temperace tvarové vložky vstřikovací formy na proces chlazení tenkostěnných polypropylenových výstřiků. V rámci experimentálního měření byl standardní (*konvenční*) temperační systém s cirkulující vodou v temperačních kanálech formy doplněn nebo zcela nahrazen temperačními systémy využívajícími horkého vzduchu, konformního způsobu chlazení, tepelné trubice nebo vysoce tepelně vodivých slitin na bázi mědi (*Moldmax HH a Ampcoloy 940*). Technologický proces vstřikování ve fázi chlazení výstřiků (*v důsledku změny temperačního systému formy*) je hodnocen na základě rozboru této problematiky měření teplotních polí v oblasti tvarové vložky vstřikovací formy a studiem krystalické struktury výstřiků, včetně mechanických vlastností, které jsou jejich odrazem. Získané poznatky a výsledky hodnocení procesu chlazení polypropylenových výstřiků lze rozdělit do třech částí (*viz kap. 8.1 až kap. 8.3, resp. kap. 8.4*), zabývajících se: vlivem tepelné vodivosti materiálu tvarové vložky vstřikovací formy, geometrického faktoru temperačních kanálů (*prostřednictvím aplikace tvarové vložky s konformním chlazením*) a užitého temperačního prostředku (*Ranque-Hilsch vírové a tepelné trubice*), resp. vlivem tepelných vlastností temperačního média.

### 8.1 Vliv tepelné vodivosti materiálu tvarové vložky

Z teplotních profilů vstřikovací formy během procesu vstřikování (*sledovaných v oblasti tvarové vložky*) lze prohlásit, že aplikací vysoce tepelně vodivých slitin na bázi mědi (*Moldmax HH a Ampcoloy 940*) došlo k intenzivnějšímu sdílení tepla tvarovou vložkou vstřikovací formy (*vzhledem k oceli*). Při hodnocení výsledků teplotních polí v nástroji a jejich diskusi je třeba mít na zřeteli místa, v nichž byly časové průběhy teplot během vstřikování a fáze chlazení sledovány. Vzhledem ke konstrukci vstřikovací formy a způsobu měření teplotních polí termočlánky byly otvory pro jejich umístění zhotoveny v oblasti tvarové vložky (*ukotvené v kotevní desce pohyblivé části formy*) tak, aby neovlivňovaly činnost formy ve fázi vstřikování a chlazení výstřiku. Sada termočlánků byla umístěna co nejblíže k povrchu tvarové vložky formy, nicméně z konstrukčních důvodů až v místech její kotevní a stírací desky, tedy mimo oblast tvarové dutiny formy v dělicí rovině, kde se realizuje intenzivní sdílení tepla vedením rovinnou stěnou a prouděním do temperačního kanálu s cirkulující vodou (*viz schéma umístění termočlánků na obr. 5.12, str. 96*). Vyšší intenzity chlazení tvarové části formy bylo podle očekávání zaznamenáno u vložky zhotovené ze slitiny Ampcoloy 940, která vykazuje přibližně dvakrát vyšší součinitel tepelné

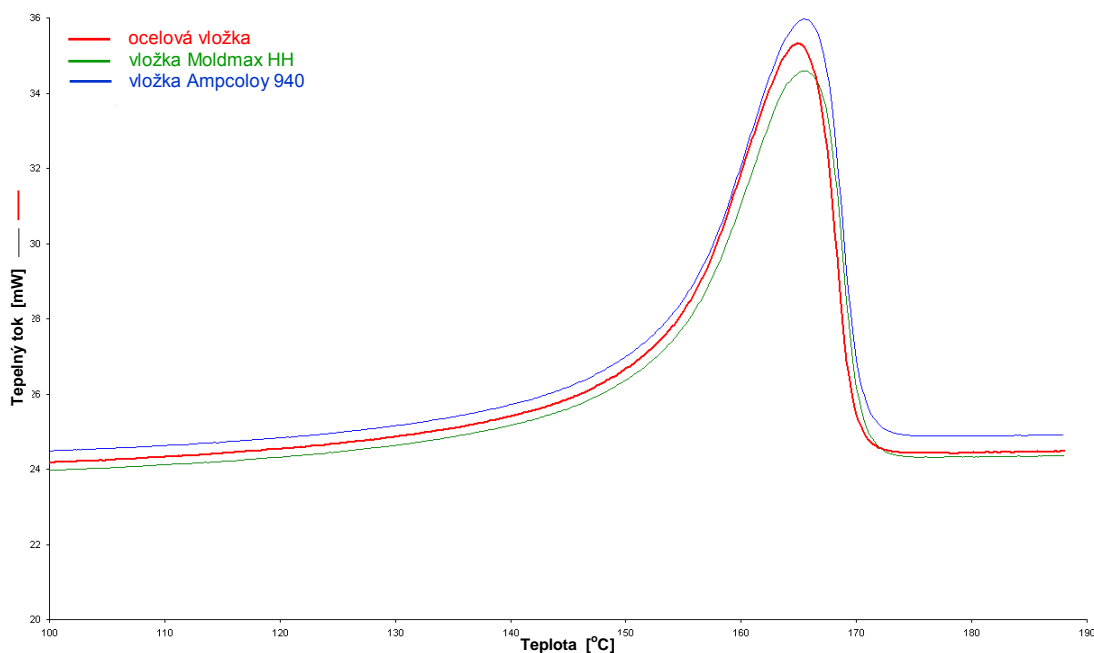


vodivosti než slitina Moldmax HH a pětikrát vyšší než nízkolegovaná ušlechtilá mangan chromová ocel. Tyto výsledky jsou v souladu s experimenty provedenými KELLYM, MULVANEY-JOHNSONEM a jejich kolektivem [25], zabývající se vlivem materiálu tvarových vložek o různém obsahu mědi ( $85 \div 96$ ) % na průběh teploty taveniny v dutině formy během procesu vstřikování lineárního polyethylenu a polybutylentereftalátu.

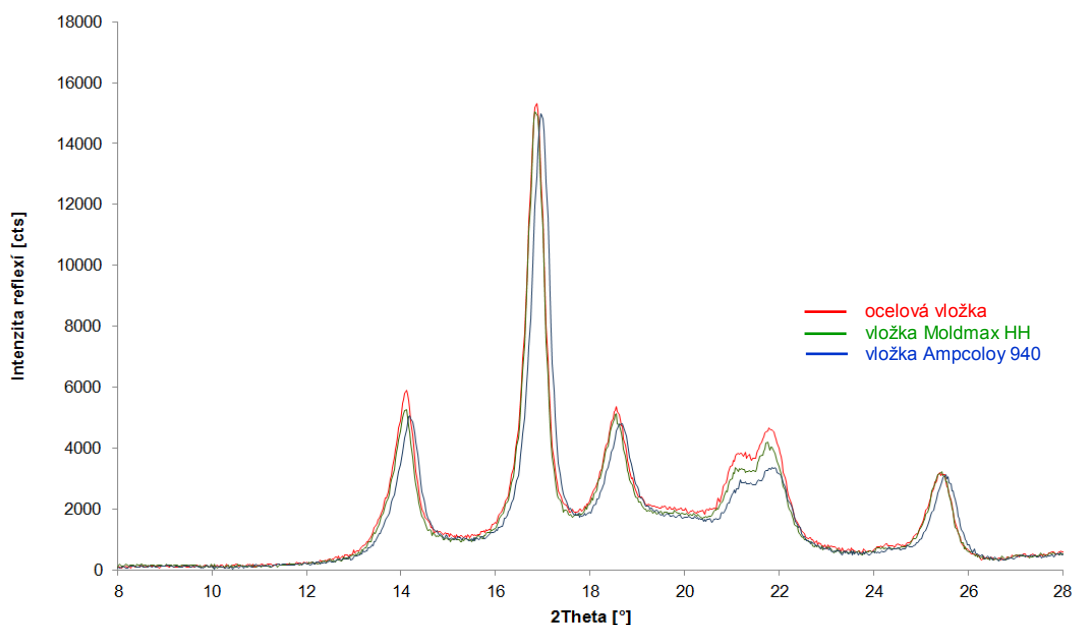
Z teplotních profilů ve vstřikovací formě, graficky znázorněných v závislosti na materiálu tvarové vložky na obr. 5.9 až obr. 5.11, resp. z rozdílů teplot mezi měřenými místy ve formě lze konstatovat, že vysocelegované slitiny mědi svými tepelnými vlastnostmi přispějí nejen k rychlému odvodu tepla z tvarové dutiny formy, ale také k vyšší míře homogenity teplotních polí v nástroji, resp. na povrchu výstřiků. Rovněž studie fy. Ancora, s.r.o. [69], zabývající se numerickým modelováním teplotních polí na povrchu výstřiku blatníku vozu Renault, vstřikovaného do formy z nástrojové oceli a slitiny mědi, poukázala na vyšší míru homogenity teplotního pole ve sledovaných místech výstřiku (*při aplikaci mědi*) až o 67 %. Míra homogenity teplotních polí je velmi důležitým faktorem, který působí na strukturu, vlastnosti a kvalitu výstřiků, především na jejich tvarovou a rozměrovou přesnost. Vyšší míra homogenity rozložení teplot v nástroji přispívá k eliminaci nerovnoměrného smršťování výstřiků, zabraňuje jejich tvarovým a rozměrovým odchylkám od standardu a potlačuje velikost teplotně reziduálních napětí uvnitř výstřiků v souladu s poznatky uvedenými KREBSEM [18] a HALAŠKOU [19]. V rámci experimentálního měření bylo zaznamenáno zrovnoměrnění teplotního pole v rozmezí ( $10 \div 30$ ) % v závislosti na teplotě temperačního média tvarové vložky (*viz obr. 5.9 až obr. 5.11, str. 94*).

Z analýzy obsahu krystalického podílu ve struktuře polypropylenových výstřiků (*měření entalpie tání metodou DSC, viz příklad na obr. 8.1 a přímým stanovením technikou širokoúhlé difrakce záření X, viz obr. 8.2*) lze prohlásit, že tento nebyl během procesu vstřikování ovlivněn tepelnou vodivostí materiálu tvarové vložky. Tyto závěry jsou ve shodě s výzkumy publikovanými RŮŽIČKOU [16], zabývající se vstřikováním polypropylenu do forem s odlišnou tepelnou vodivostí na bázi mosazi a pertinaxu i BARETEM [26], který při zpracování polypropylenu aplikoval tvarové vložky z epoxidové pryskyřice, slitin zinku a hliníku. Doba chlazení taveniny polypropylenu v dutině formy (*v důsledku změny tepelné vodivosti materiálu tvarové vložky, ale také teploty formy v doporučeném rozpětí pro zpracování polypropylenů*) tak neovlivnila krystalickou strukturu tenkostěnných výstřiků. Je to zřejmě způsobeno vysokou rychlostí tvorby krystalické fáze izotaktického polypropylenu a v případě polypropylenu Mosten MT 230 zejména vlivem heterogenních částic, které tvoří nukleační zárodky a tvorbu krystalické fáze urychlují. Z rozboru uvedené problematiky v rešeršní části disertační práce, ale také ze studie publikované RŮŽIČKOU

[16], je třeba upozornit na skutečnost, že tyto závěry platí pouze v rámci provedeného experimentálního měření pro polypropylen, neboť u jiných typů polymerů (*např. polyoxymethylenu nebo polyamidu*) byly naopak změny v obsahu krystalického podílu ve struktuře materiálu (v závislosti na tepelné vodivosti materiálu formy) zaznamenány.



**Obr. 8.1** Entalpická přeměna tání pro PP výstřik Mosten MT 230 v závislosti na tepelné vodivosti materiálu tvarové vložky ( $T_{lm} = 45^\circ\text{C}$ )

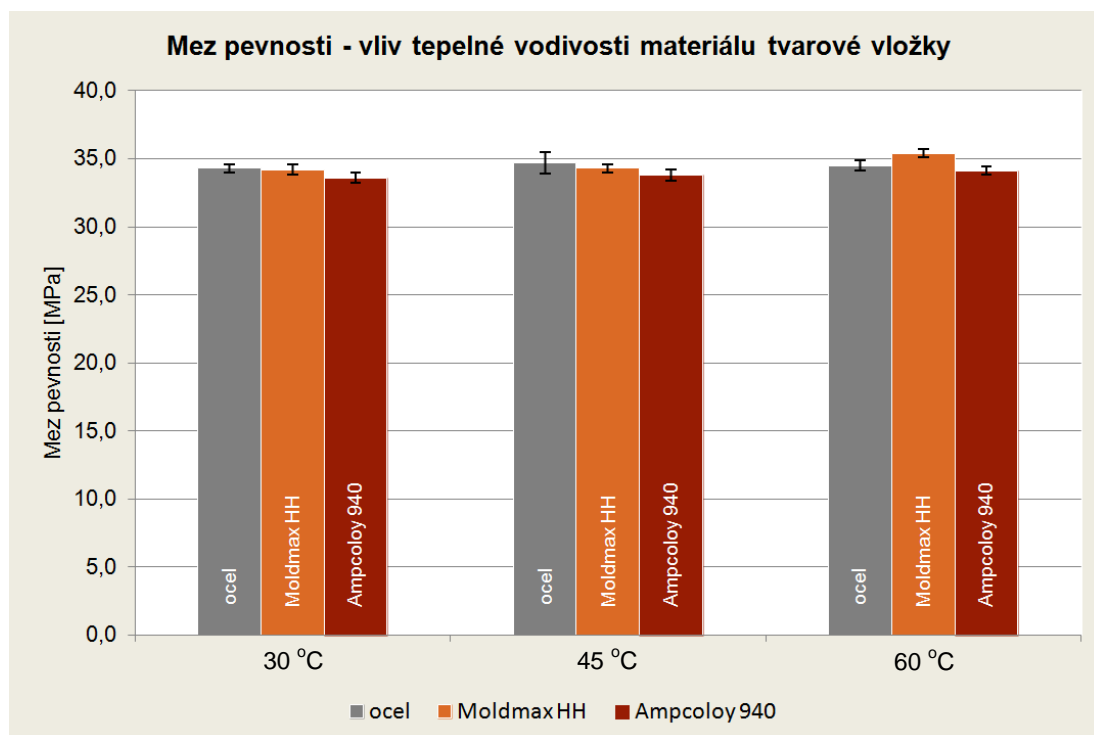


**Obr. 8.2** Difraktogram pro PP výstřik Mosten MT 230 v závislosti na tepelné vodivosti materiálu tvarové vložky ( $T_{lm} = 45^\circ\text{C}$ )

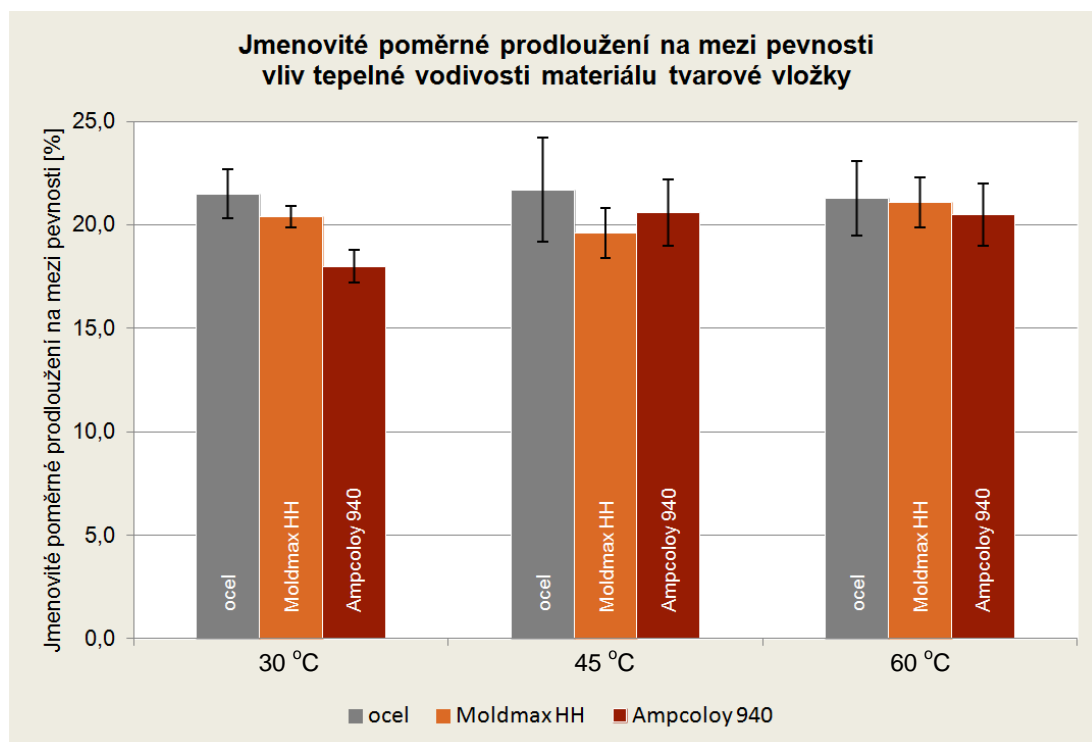
Z výsledků odborných studií, zabývajících se výzkumem vnitřní struktury polymer-  
ních výstřiků, která spolurozhoduje o jejich konečných vlastnostech, lze konstatovat, že  
změnou tepelné vodivosti materiálu formy dochází k výrazným rozdílům mezi texturami  
povrchu a vnitřku vzorku (*v závislosti na tloušťce jeho stěny*) [16, 23-26]. V případě ten-  
kostěnného polypropylenového výstřiku (1,3 mm) lze předpokládat, že změna tloušťky  
tenké povrchové vrstvy, u které nebývá pozorována výraznější struktura, bude v důsledku  
aplikace materiálů s vyšší teplenou vodivostí minimální, neboť vzhledem k tloušťce stěny  
výstřiku je chlazení realizováno již samo o sobě intenzivně. Tento předpoklad lze opřít  
o výsledky studie uvedené pod odkazem [16]. Vzhledem k přítomnosti nukleantů v poly-  
propylenu jej nebylo možné podložit snímky tenkých řezů v polarizovaném světle mikro-  
skopu. Na základě tohoto předpokladu je zřejmé, že významný vliv na případnou změnu  
vlastností výstřiku (*v důsledku změny tepelné vodivosti materiálu tvarové vložky formy,*  
*resp. v důsledku rychlosti odvodu tepla z taveniny polymeru*) tak bude mít tvar vnitřní sfé-  
rolitické struktury. Z poznatků, uvedených např. MEISTEREM, JUNGMEIEREM, EHRS-  
TEINEM a DRUMMEREM [23, 24], zabývajících se vlastnostmi polyamidových a polyoxy-  
methylenových mikrovýstřiků, zhotovených ve formě s tvarovými vložkami z oceli  
( $\lambda=30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), keramiky ( $\lambda=2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) nebo vysoce tepelně odolného polyetherether-  
ketonu ( $\lambda=0,25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), lze uvést, že jemnější sférolitické struktury výstřiku je dosaže-  
no u materiálu tvarové vložky s vyšším součinitelem tepelné vodivosti. Obdobným vlivem  
materiálu tvarové vložky na vnitřní strukturu polypropylenového výstřiku o tloušťce 1 mm  
a 4 mm se zabýval RŮŽIČKA [16], který uvádí, že středová (*sférolitická*) vrstva struktury  
polypropylenových a polyoxymethylenových výstřiků, vyrobených v mosazné vložce  
( $\lambda=112 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), je jemnější než u výstřiků z vložky pertinaxové ( $\lambda=0,219 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), což  
odpovídá vyšší rychlosti chlazení taveniny v mosazné vložce. Polymerní výstřiky  
v důsledku jemnější sférolitické struktury vykazují lepší mechanické vlastnosti, jako je  
např. mez pevnosti. Závěry z uvedených studií potvrzuje rovněž BARETA [26], který se  
zabýval vlivem tepelné vodivosti materiálu formy na vnitřní sférolitickou strukturu polypro-  
pyleny. V případě polypropyleny obsahující nukleanty (*použitého pro experimentální mě-  
ření v rámci disertační práce*) lze předpokládat, že středová vrstva výstřiku, resp. velikost  
sférolitů bude ovlivněna především vysokou nukleací vlivem dispergované cizorodé pří-  
měsi než rychlostí chlazení (*v důsledku změny materiálu formy s vyšší teplenou vodivos-  
tí*). Dokladují to rovněž závěry z hodnocení mechanických vlastností výstřiků, které nebyly  
ovlivněny.

Vliv tepelné vodivosti materiálu tvarové vložky na konečné vlastnosti výstřiků je  
zřejmý z obr. 8.3 až obr. 8.6. Grafické závislosti pro různé teploty standardního temperač-

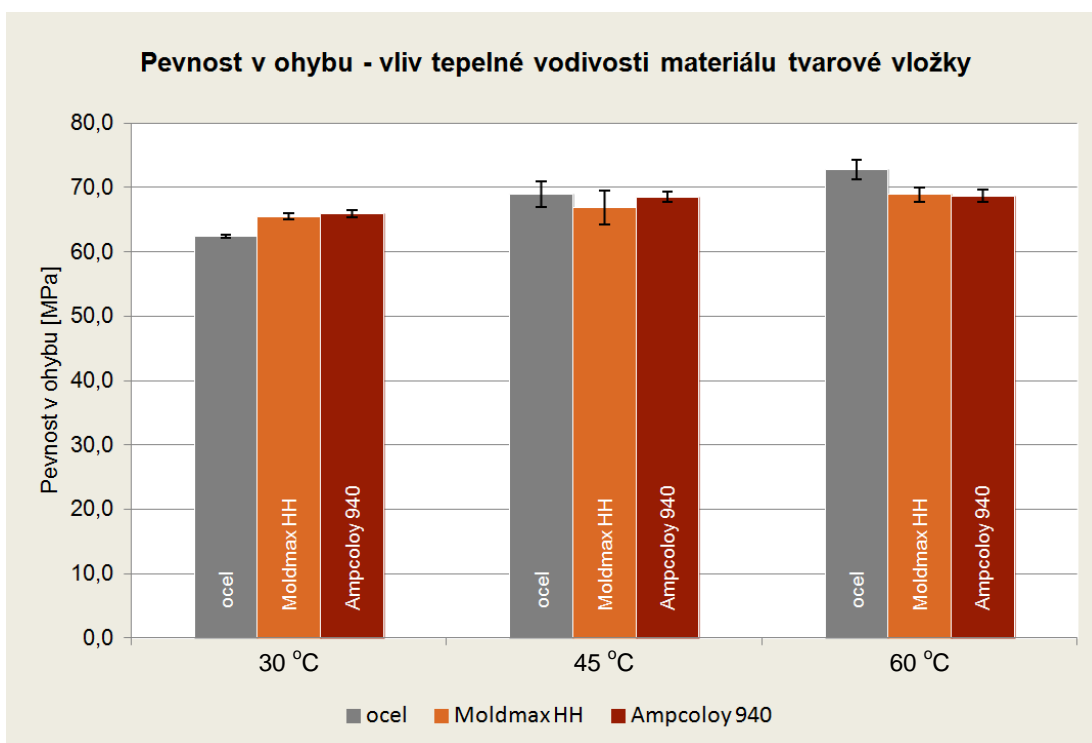
ního média, tj. vody cirkulující v temperačních kanálech pevné i pohyblivé části formy, znázorňují mez pevnosti, jmenovité poměrné prodloužení na mez pevnosti, pevnost v ohybu a modul pružnosti v ohybu výstřiku (*včetně statistického vyhodnocení v podobě směrodatných odchylek*) v závislosti na materiálu formy. Z uvedených závislostí lze s ohledem na statistické zhodnocení výsledků směrodatnou odchylkou a intervalem spolehlivosti (*viz kap. 7*) konstatovat, že u tenkostěnných polypropylenových výstřiků (*plněných nukleanty*) nebyly shledány významné změny sledovaných vlastností v závislosti na tepelné vodivosti materiálu tvarové vložky vstřikovací formy (*ocel, slitiny mědi*). Tyto závěry jsou shodné s výsledky studia vlastností výstřiků z lineárního polyethylenu a polybutylentereftalátu, vstřikovaných do formy s ocelovou vložkou a vložkami ze slitin mědi (*Moldmax XL, Moldmax HH, Ampcoloy 944, Ampcoloy 940 a CTC - označení pro vývojovou slitinu*), publikovanými KELLYM, MULVANEY-JOHNSONEM a kol. pod odkazem [25].



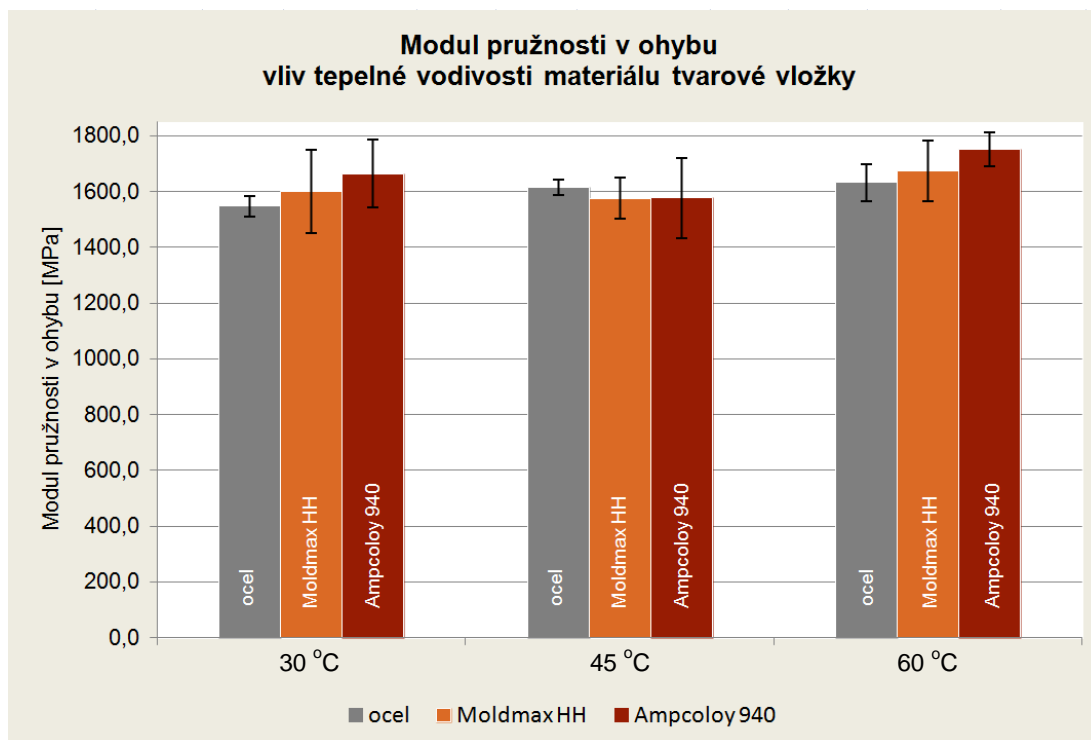
**Obr. 8.3** Mez pevnosti PP výstřiků Mosten MT 230  
v závislosti na tepelné vodivosti materiálu tvarové vložky



**Obr. 8.4** Jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti PP výstřiků Mosten MT 230  
v závislosti na tepelné vodivosti materiálu tvarové vložky



**Obr. 8.5** Pevnost v ohybu PP výstřiků Mosten MT 230  
v závislosti na tepelné vodivosti materiálu tvarové vložky



**Obr. 8.6** Modul pružnosti v ohybu PP výstřiků Mosten MT 230  
v závislosti na tepelné vodivosti materiálu tvarové vložky

Závěrem diskuse vlivu tepelné vodivosti materiálu tvarové vložky na proces chlazení tenkostěnných polypropylenových výstřiků, obsahující přísadku nukleantů (*heterogenních částic*), lze prohlásit, že použitím tvarových vložek ze slitin mědi došlo k vyššímu odvodu tepla z nástroje a rovnoměrnějšímu rozložení teplot na jeho povrchu, přičemž obsah krystalického podílu ve struktuře výstřiku nezaznamenal žádných změn, obdobně jako jejich mechanické vlastnosti, u nichž jsou případné drobné nuance pod hranicí statistické významnosti a mohou být ovlivněny faktory, provázející jejich stanovení.

## 8.2 Vliv geometrického faktoru temperačních kanálů s cirkulujícím médiem

V případě standardního temperačního systému s cirkulující vodou v temperačních kanálech formy (*popřípadě olej*) je rychlost chlazení, resp. tepelný tok mezi formou a temperačním médiem ovlivněn nejen fyzikálními vlastnostmi materiálu formy a teplosměnného média (*tj. tepelnou i teplotní vodivostí a kinematickou viskozitou média*), ale také jeho objemovou průtokovou rychlostí a na základě rovnice prostupu tepla (*viz kap. 2.2*) rovněž konstrukcí temperačních kanálů, tzn. jejich průřezem, vzdáleností od povrchu tvarové dutiny formy a velikostí teplosměnného povrchu [16]. Poslední jmenované faktory jsou zohledněny právě v principu tzv. konformního chlazení vstřikovacích forem. Jedná se o způsob temperace tvarových částí forem, u nichž temperační kanály sledují obrys tvaro-

vé vložky zhotovené spékáním kovových, popřípadě nekovových prášků po vrstvách metodou „DMLS“ (*Direct Metal Laser Sintering*) na základě 3D CAD modelu.

Pro účely experimentálního výzkumu byla ve spolupráci s firmou Innomia, a.s Jarměř zhotovena tvarová vložka s temperačními kanály oválného průřezu sledující její obrys (viz obr. 4.8, str. 80). Hlavními rozdíly vzhledem k standardnímu temperačnímu systému s cirkulující vodou v temperačním kanálu tvarové vložky (*opatřeným plochou přepážkou*, viz kap. 4.1.2) jsou: kratší vzdálenost mezi povrchem tvarové dutiny formy a temperačního kanálu (*3 mm od povrchu tvarové vložky, namísto až 11,8 mm pro případ standardního vrtaného temperačního kanálu*) a dále větší teplosměnný povrch v oblasti tvarové dutiny formy (*3571 mm<sup>2</sup> na rozdíl od 1025 mm<sup>2</sup> pro případ standardního vrtaného temperačního kanálu*), který je určen změnou geometrie a velikosti průřezu temperačního kanálu. Průřez temperačních kanálů konformního systému chlazení je o ca. 75 % menší, než kruhový, resp. půlkruhový průřez standardního vrtaného temperačního kanálu (*kruhový průřez je rozdělen plochou přepážkou na dva půlkruhové*) a na základě této skutečnosti je z rovnice kontinuity zřejmé, že pro případ konformního způsobu chlazení bylo dosaženo vyšší rychlosti proudění teplotnosného média v temperačních kanálech a tím vyšší hodnoty Reynoldsova čísla, resp. součinitele přestupu tepla mezi stěnou temperačního kanálu a teplotnosným médiem (viz příloha 8). Na druhé straně, v případě materiálu tvarové vložky zhotovené spékáním kovového prášku z oceli X5CrNiCuNb16-4, je hodnota součinitele tepelné vodivosti menší ( $\lambda=12 \div 14 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) než u oceli 16MnCr5 použité k výrobě vložky se standardním temperačním kanálem a plochou přepážkou ( $\lambda=42 \div 45 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ).

Na základě výpočtu součinitele prostupu tepla mezi formou a teplotnosným médiem (viz příloha 8), resp. na základě geometrického faktoru temperačních kanálů, fyzikálních vlastností materiálu tvarové vložky a teplotnosného média je nesporné, že nejnižšího součinitele prostupu tepla bude zaznamenáno v případě standardního temperačního systému s ocelovou tvarovou vložkou 16MnCr5. Aplikací materiálu s vyšší tepelnou vodivostí, popřípadě úpravou geometrického faktoru temperačních kanálů se součinitel prostupu tepla zvyšuje. Pro podmínky experimentálního výzkumu je vyšších hodnot součinitele prostupu tepla dosaženo při aplikaci konformního způsobu chlazení v ocelové vložce X5CrNiCuNb16-4. Nejvyššího součinitele prostupu tepla je dosaženo při aplikacích materiálů Moldmax HH a Ampcoloy 940 za standardního způsobu chlazení tvarové vložky přepážkovým systémem. Celkový tepelný tok mezi formou a teplotnosným médiem (viz rovnice 2.8) je ovlivněn nejen velikostí součinitele prostupu tepla, ale zejména také velikostí teplosměnné plochy a způsobem cirkulace teplotnosného média, ovlivňující teplotní diferenci mezi povrchem tvarové vložky a teplotnosným médiem. Z modelu konformního chla-

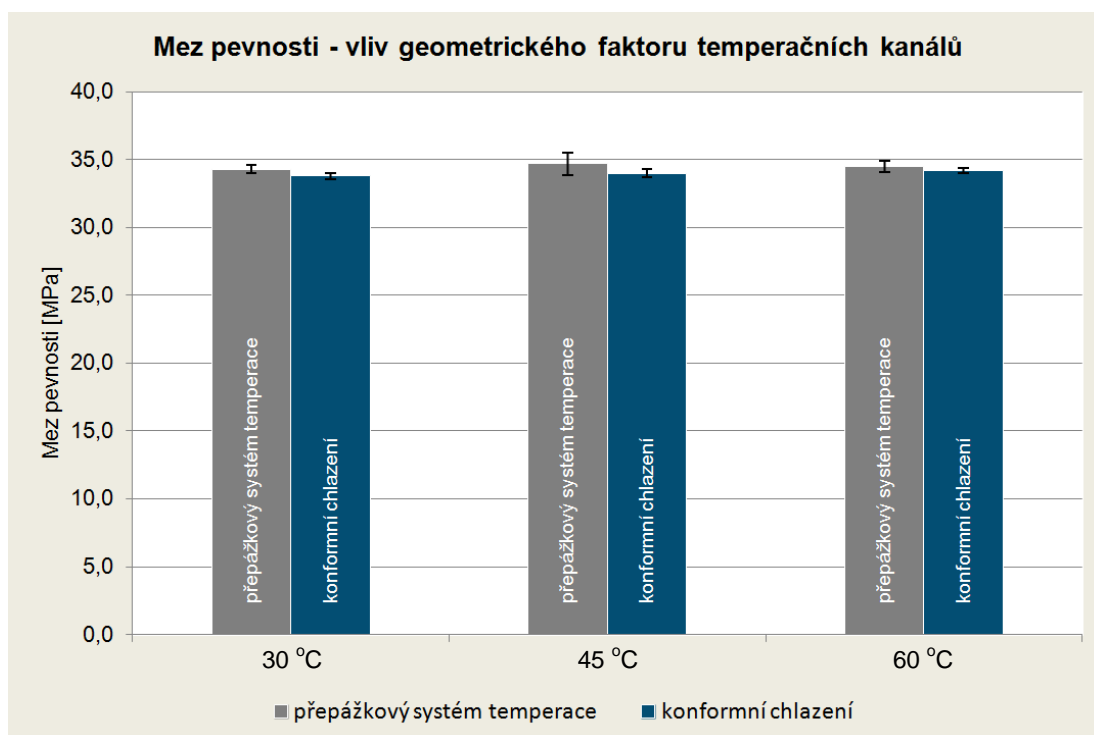
zení (viz obr. 4.8, str. 80) je zřejmé, že v oblasti tvarové dutiny formy cirkuluje teponosné médium ve dvou šroubovicích. V první je teponosné médium o teplotě  $(30 \div 60)^\circ\text{C}$  dopravováno směrem k vrcholu tvárníku, v oblasti tvarové dutiny formy dochází k intenzivnímu sdílení tepla z taveniny plastu do tvarové vložky a teponosného média, na vrcholu tvárníku přechází ohřáté teponosné médium spojovacím kanálem do druhé šroubovice a po stejném povrchu (obvodu) tvarové vložky cirkuluje zpět do hlavního temperačního kanálu. Povrch tvarové vložky tak sledují dva kanály s cirkulujícím teponosným médiem o různé teplotě. Ve srovnání s přepážkovým systémem temperace tvarové vložky znesnadňuje tento způsob výpočet tepelného toku v daném místě podle rovnice (2.8), resp. pro jeho zjednodušený výpočet by bylo nutné použít střední hodnoty teploty teponosného média, určené průměrem teploty na vstupu a na výstupu z temperačního okruhu. Z diskuse v kap. 8.4 a z obr. 8.21, znázorňující tokové vlastnosti taveniny plastu v dutině formy (v závislosti na způsobu temperace tvarové vložky) je zřejmé, že konformním systémem chlazení tvarové vložky došlo oproti standardnímu systému temperace k rychlejšímu odvodu tepla z taveniny plastu.

Jak již bylo uvedeno, povrch (obrys) tvarové vložky sledují dva temperační kanály ve tvaru šroubovice. V úzké oblasti povrchu tvarové vložky je tedy její teplota ovlivněna teplotou cirkulujícího média v jednom i druhém temperačním kanálu, tzn. cirkulující vodou o nižší i vyšší hodnotě teploty. Z tohoto důvodu poukazují teplotní pole, zaznamenaná pro případ aplikace konformního způsobu chlazení graficky na obr. 5.13 až obr. 5.15 (*výrazně ovlivněná místa umístění termočlánků*), více než na rychlost sdílení tepla především na míru homogenity rozložení teplot po povrchu tvarové vložky a tedy i výstřiku. Z teplotních profilů vstřikovací formy je zřetelné, že konformním způsobem chlazení byla příznivě ovlivněna homogenita teplotního pole, zejména při nižších teplotách temperace. Ze všech aplikovaných temperačních systémů (*pro podmínky experimentálního výzkumu*) bylo ve sledovaných místech vstřikovací formy zaznamenáno nejnižších rozdílů teplot právě při aplikaci konformního chlazení, které tak zlepšuje homogenitu teplotních polí až o 42 % pro případ teploty temperace  $30^\circ\text{C}$ , resp.  $(25 \div 26) \%$  pro teploty temperace  $45^\circ\text{C}$  a  $60^\circ\text{C}$ .

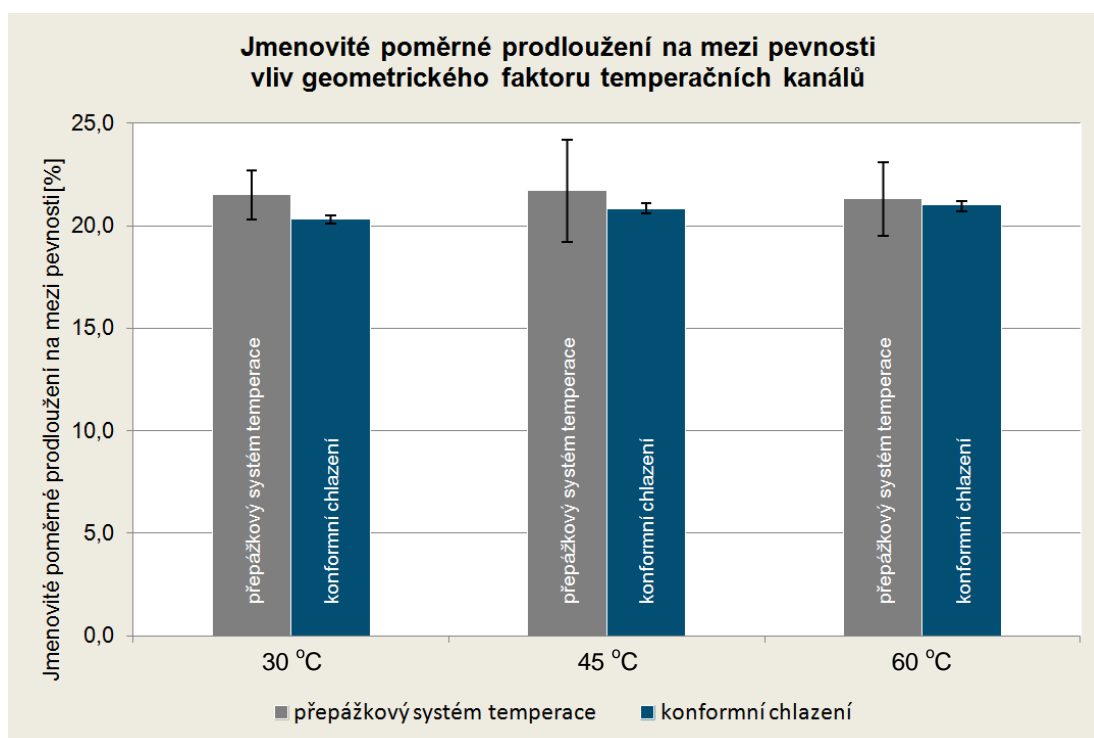
Na základě výsledků mechanických vlastností polypropylenových výstřiků a jejich statistického zhodnocení lze konstatovat, že aplikací konformního způsobu chlazení tvarové vložky (*nahrazující standardní přepážkový systém s cirkulující vodou v temperačním kanálu*) nedošlo k ovlivnění mechanických vlastností výstřiků, jako jsou mez pevnosti, jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti a pevnost v ohybu (viz obr. 8.7 až obr. 8.9). Naopak v případě modulu pružnosti v ohybu byl u výstřiků chlazených konformním způsobem zaznamenán pokles jeho hodnoty (viz obr. 8.10), zejména při nižších tep-



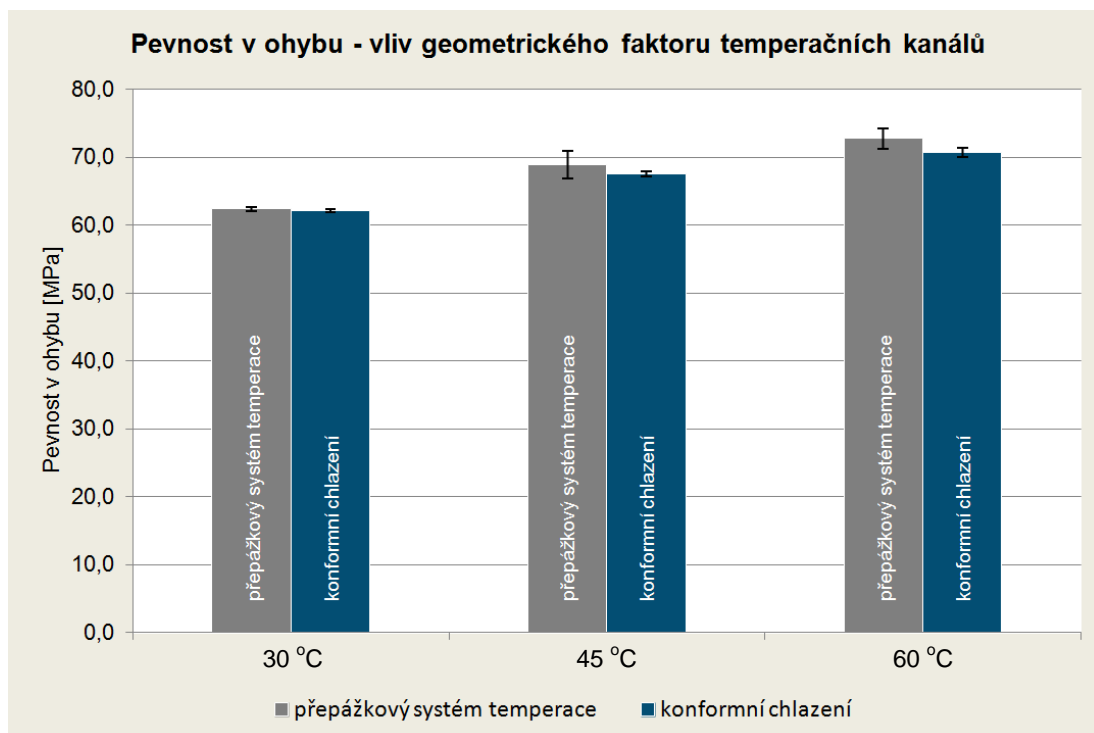
lotách teploty (například při teplotě teplonosného média 30 °C byl v důsledku aplikace konformního způsobu chlazení zaznamenán pokles modulu pružnosti v ohybu ca. o 9%).



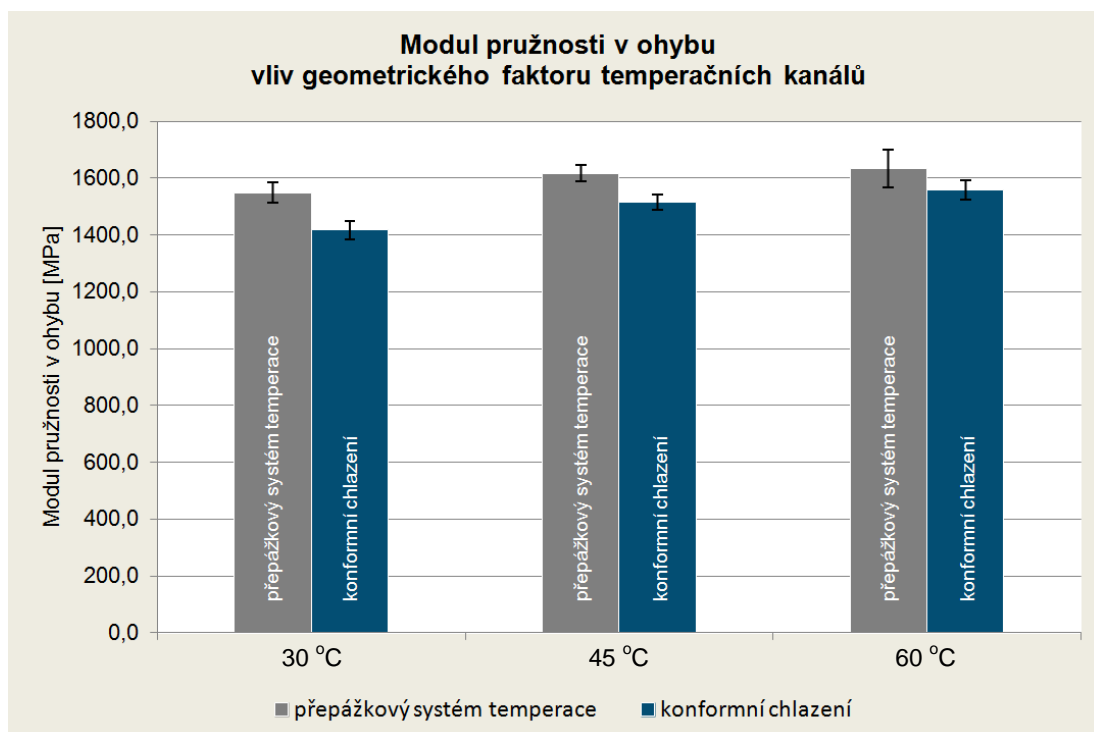
**Obr. 8.7** Mez pevnosti PP výstřiků Mosten MT 230  
v závislosti na geometrickém faktoru temperačních kanálů



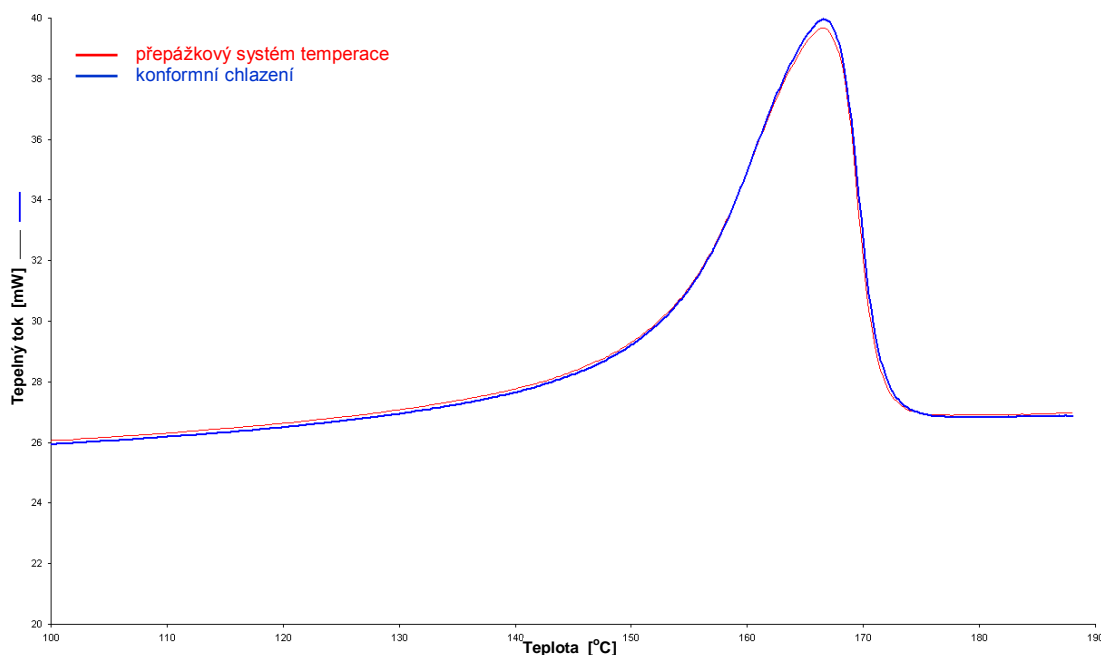
**Obr. 8.8** Jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti PP výstřiků Mosten MT 230  
v závislosti na geometrickém faktoru temperačních kanálů



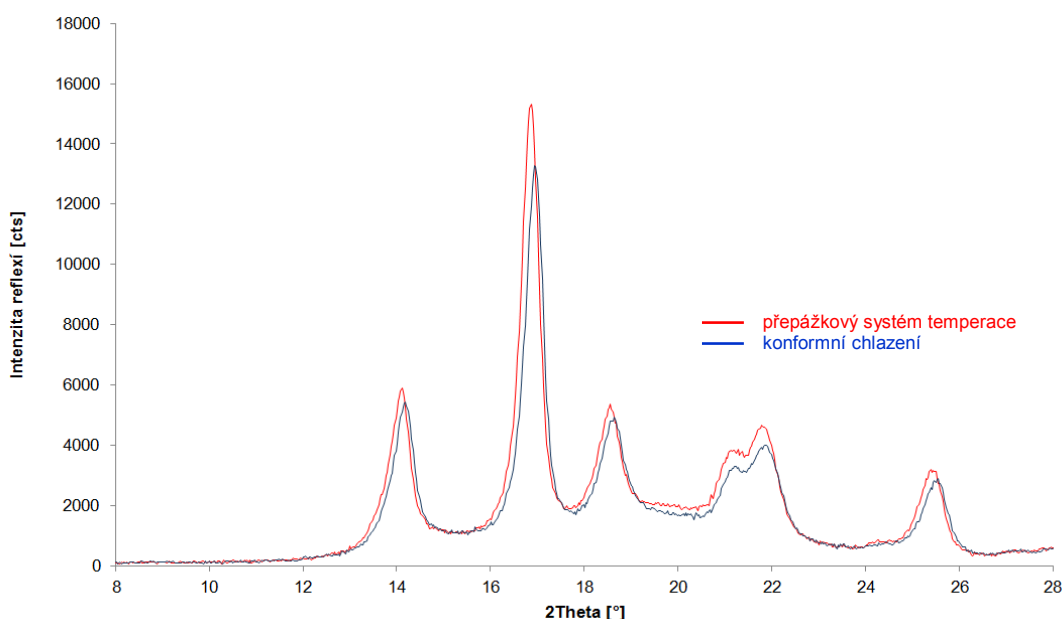
**Obr. 8.9** Pevnost v ohybu PP výstřiků Mosten MT 230  
v závislosti na geometrickém faktoru temperačních kanálů



**Obr. 8.10** Modul pružnosti v ohybu PP výstřiků Mosten MT 230  
v závislosti na geometrickém faktoru temperačních kanálů



**Obr. 8.11** Entalpická přeměna tání pro PP výstřik Mosten MT 230  
v závislosti na geometrickém faktoru temperačních kanálů ( $T_{tm} = 45\text{ °C}$ )



**Obr. 8.12** Difraktogram pro PP výstřik Mosten MT 230  
v závislosti na geometrickém faktoru temperačních kanálů ( $T_{tm} = 45\text{ °C}$ )

Na základě měření stupně krystalinity metodami DSC a XRD, tzn. nepřímým způsobem sledováním entalpických přeměn ve fázi tavení materiálu (viz příklad na obr. 8.11) a přímo na základě stanovení integrální intenzity rozptylu záření X na krystalické a amorf- ní složce (viz příklad na obr. 8.12), lze konstatovat, že výsledný obsah krystalické fáze ve

strukturu výstřiku nevykazuje významných změn. Z rozboru v kap. 8.1 lze předpokládat, že velikost krystalických útvarů ve středové vrstvě výstřiku je ovlivněna více nukleanty než aplikací konformního způsobu chlazení. Pokles modulu pružnosti v ohybu, zejména při nejnižší teplotě temperace ( $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), tak bude pravděpodobně způsoben orientací makromolekul v povrchové vrstvě výstřiku (*orientace v povrchové vrstvě vzniká kvůli elongačním deformacím působícím při fontánovém toku [16]*), která má u tenkostěnných dílů velké zastoupení (*v důsledku rychlého chlazení*) a jak dokládá RŮŽIČKA [16] dosahuje zde smyková rychlost nejvyšších hodnot (*viz také teoretický rozbor na obr. 3.7, str. 54*). V důsledku rychlého chlazení taveniny v povrchové vrstvě nestačí makromolekuly relaxovat a ve směru tečení vykazuje výstřik větší pevnost i modul pružnosti, než ve směru kolmém (*směr odběru vzorku*) [18], v němž je zatěžován odebraný vzorek při hodnocení ohybových vlastností. Modul pružnosti v ohybu je stanoven z hodnot napětí v ohybu a deformací 0,05 % a 0,25 %, které odpovídají hodnotám průhybu 0,04 mm a 0,22 mm (*při tloušťce tělesa 1,3 mm a vzdálenosti podpěr 26 mm, viz kap. 7.2*). Je tedy zřejmé, že výsledný modul pružnosti v ohybu bude odrazem povrchové vrstvy výstřiku, která v důsledku rychlého chlazení (*zejména pak při nižší teplotě formy*) vykazuje vysoký stupeň orientace.

### 8.3 Vliv temperačního prostředí – vírové a tepelné trubice

V průběhu experimentálního výzkumu byly k temperaci tvarové vložky vstřikovací formy použity dva, resp. tři temperační prostředky (*média*): cirkulující voda v temperačním kanálu s plochou přepážkou (*představující standardní temperační prostředek*), vírová a kapilární tepelná trubice.

#### 8.3.1 Vliv Ranque-Hilsch vírové trubice

V případě aplikace Ranque-Hilsch vírové trubice, resp. stlačeného vzduchu, který vychází z horkého výfuku trubice do prostoru tvarové vložky, lze na základě časových závislostí teplot uvnitř vstřikovací formy konstatovat, že množství odvedeného tepla z nástroje horkým vzduchem, resp. tepelný tok mezi tvarovou vložkou a temperačním médiem je vzhledem k aplikaci standardního temperačního prostředí velmi malý. Tepelný tok mezi tvarovou vložkou a temperačním médiem (*vyjádřený v jednotlivých etapách Fourierovým a Newtonským zákonem*) je v případě aplikace horkého vzduchu ovlivněn nižším součinitelem přestupu tepla mezi stěnou temperačního kanálu a vzduchem ( $\alpha_k$ ), tzn. nižším součinitelem tepelné vodivosti vzduchu ( $\lambda$ ) a hodnotou Prandtlova čísla ( $Pr$ ), které je dáno vyšší kinematickou viskozitou vzduchu ( $\nu$ ), nižší hodnotou měrné tepelné kapacity ( $c_p$ ) a jeho hustoty ( $\rho$ ). Všechny uvedené parametry jsou obecně závislé na vněj-

ších podmínkách, tedy teplotě, tlaku a vlhkosti, která byla účinně odstraněna sušičkou zařazenou v rozvodné síti (*viz poznámka v kap. 4.1.2.1*). Při vzájemném porovnání tepelných vlastností vzduchu a vody (*při stejné teplotě a atmosférickém tlaku*) lze konstatovat, že součinitel tepelné vodivosti vzduchu dosahuje ca. 4 % hodnoty součinitele tepelné vodivosti vody, v případě Prandtlova čísla, které dává do souvislosti viskozitu a přestup tepla konvekci, ca. 24 % hodnoty odpovídající Prandtlovu číslu vody (*při nejvyšší teplotě média 60 °C*) [139]. Součinitel přestupu tepla mezi stěnou temperačního kanálu a vzduchem je rovněž ovlivněn hodnotou Reynoldsova čísla ( $Re$ ) a to minimálně v důsledku změny kinematické viskozity temperačního média.

Důležitou součástí hodnocení temperace tvarové vložky vírovou trubicí (*resp. horkým vzduchem*) bylo porovnání její účinnosti s běžným, konvenčním temperačním systémem s cirkulující vodou v temperačním kanálu. Na základě dosažených výsledků, *resp.* v důsledku nízkého odvodu tepla z tvarové vložky pohyblivé části nástroje, temperované vzduchem, lze uvést, že docílení rovnováhy mezi přivedeným a odvedeným teplem z formy je časově velmi náročné, *resp.* nebylo této dosaženo ani po 50 výrobních cyklech, na rozdíl od případu temperace s cirkulující vodou, kde bylo rovnováhy mezi přivedeným a odvedeným teplem dosaženo během několika málo cyklů (*viz např. obr. 5.6, str. 92*). Při temperaci tvarové vložky vodou byla teplota formy během výrobního procesu udržena v požadované toleranci, tzn. že se během procesu vstřikování nezvyšovala a to v důsledku rychlého odvodu tepla (*na rozdíl od případu aplikace vírové trubice*). Přestože v případě vírové trubice byla zaznamenána vyšší míra homogenity teplotního pole v oblasti tvarové vložky, bude nerovnováha mezi přivedeným a odvedeným teplem z nástroje příčinou nestability výrobního procesu i kvality výstřiků, neboť jejich teplota při vyjímání z formy, ale i podmínky chlazení se pro každý díl s rostoucím počtem cyklů mění. Tento nežádoucí průběh teploty v oblasti tvarové vložky nebyl odstraněn ani změnou teploty teplotnosného média v temperačních kanálech tvárnice vstřikovací formy. V jednotlivých výrobních cyklech tak nebude možné zajistit odpovídající reprodukovatelnost podmínek chlazení výstřiku a jeho kvality.

Nevýhodou aplikace horkého vzduchu (*resp. vírové trubice*) je vzhledem k jeho tepelným vlastnostem rovněž nastavení teploty formy před začátkem výroby v odpovídajícím čase. V kap. 5.1 je konstatováno, že s ohledem na značné rozdíly mezi přivedeným a odvedeným teplem z tvarové vložky vstřikovací formy, zaznamenané při teplotě vzduchu 30 °C a 45 °C, nebylo již dále realizováno měření teplotních polí v oblasti tvarové vložky pro teplotu vzduchu 60 °C. Přestože maximální teplota vzduchu na horkém výfuku trubice dosahuje hodnot až ca. 100 °C (*viz grafický záznam na obr. 4.5, str. 75*),

nebylo ve skutečnosti možné vytemperovat formu v odpovídajícím čase před začátkem výroby na teplotu vyšší jak 45 °C (*vzhledem k velmi nízkému součiniteli přestupu tepla mezi vzduchem a stěnou temperačního kanálu*).

### 8.3.2 Vliv tepelné trubice

Z teplotních profilů ve sledovaných místech vstřikovací formy lze při aplikaci tepelné trubice shledat, že střed teplotního pole (*vymezený maximální a minimální teplotou*) leží v případě tepelné trubice vždy výše nad teplotou temperace (*resp. temperačního média*), a výše než střed teplotního pole ustaveného konvenčním způsobem chlazení (*viz obr. 5.16 až obr. 5.18, str. 100*). Tato skutečnost odpovídá způsobu chlazení a principu činnosti tepelné trubice, která přenáší teplo po celé své délce. Teplotní profily formy odpovídají poznatkům uvedenými LINHARTEM [133], kdy teplota formy ustavená tepelnou trubicí v oblasti přilehlé výparné části trubice je vyšší, než teplota v oblasti přilehlé části kondenzační, která je umístěna do oblasti hlavního temperačního kanálu s cirkulující vodou v upínací desce pohyblivé části formy (*viz obr. 4.6, str. 76*).

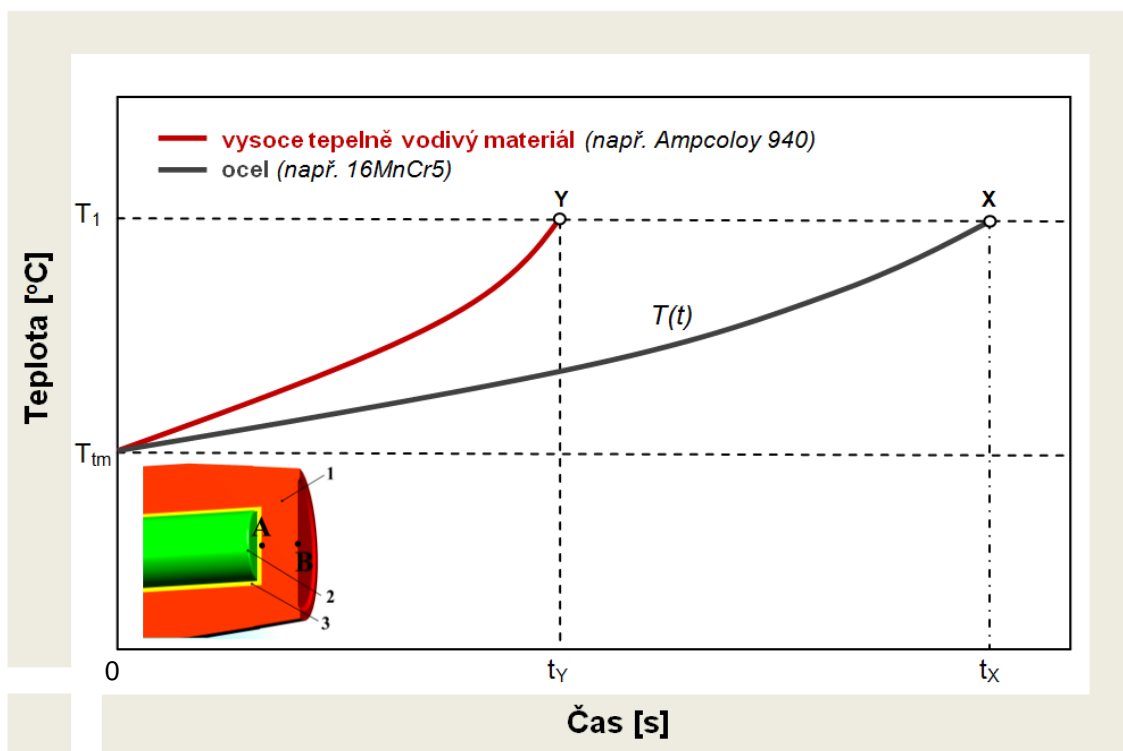
Z rešeršních poznatků vyplývá, že tepelný výkon tepelné trubice (*tj. tepelný tok v jejím axiálním směru*) je určen rozdílem teplot mezi výparnou a kondenzační částí trubice a podílem součtu všech tepelných odporů při vypařování a kondenzaci teplosměnného média (*pracovní kapaliny uvnitř trubice*). Tepelný výkon tepelných trubic, které pracují při různých okrajových podmínkách, závisí na druhu teplosměnného média (*je úměrný jeho látkovým vlastnostem*) a je omezen nejnižší hodnotou tzv. limitů tepelného výkonu, které vyjadřují vztah na skutečné termokinetické pochody v tepelné trubicí (*viz kap. 2.2.2.2*) [58, 60].

Přenášené teplo tepelnou trubicí je tedy omezeno dvěma faktory: maximální teplotou a rychlostí, jakou se kondenzát vrací zpět. Pokud je dosažena maximální teplota, je zřejmé, že dojde k odpaření veškeré pracovní kapaliny a chladicí schopnost tepelné trubice klesne na úroveň obyčejné duté trubice. Tuto kritickou teplotu (*nebo množství přenášeného tepla*) ovlivňuje množství kapaliny v trubicí, tepelná vodivost materiálu pláště trubice i kvalita chladiče. Tomuto průběhu je nutné předcházet již při návrhu tepelné trubice pro konkrétní aplikaci. Druhý faktor souvisí s kondenzační částí trubice a její kapilární soustavou. Vypařuje-li se na horkém konci ve výparné části trubice pracovní kapalina rychleji, než se tam kapilární soustavou dostává nová, začne se horký konec po trubicí posouvat vzhůru. V takovémto případě by byl výstřik chlazen pouze tepelnou vodivostí stěn materiálu tepelné trubice. Tepelný výkon trubice je ovlivněn tedy také její efektivní délkou, tj. vzdáleností mezi místy sdílení tepla z taveniny plastu, resp. ze stěn tvarové

vložky do trubice a z trubice do okolí (*v případě experimentálního výzkumu do temperačního kanálu s cirkulující vodou*). K intenzifikaci sdílení tepla do okolí je kondenzační část tepelné trubice vyvedena do hlavního temperačního kanálu s cirkulující vodou v upínací desce pohyblivé části formy (*tzv. smáčená část tepelné trubice*). K přenesení uvolněného tepla z taveniny plastu je zapotřebí vhodně dimenzovat kondenzační část tepelné trubice, tzn. její délku nebo velikost teplosměnné plochy. Při daných procesních a konstrukčních podmínkách formy je délka tepelné trubice, resp. velikost plochy obtékaná temperačním médiem určena teplotou média, resp. rozdílem teplot mezi formou a temperačním médiem (*viz výpočet tepelných poměrů, kap. 4.1.2.2*).

V rámci výzkumu disertační práce byla, namísto konvenčního způsobu temperace tvarové vložky cirkulující vodou přepážkovým systémem, aplikována tepelná trubice, která je v praxi používána v případech, kdy nelze vhodným způsobem v tvarových částech formy uložit kanály s cirkulující vodou. Při aplikaci tepelné trubice je zpravidla temperace formy na provozní teplotu zajištěna teplem z taveniny polymeru a teplota formy je udržována přenosem tepla tepelnou trubicí. V oblasti kondenzační části tepelné trubice, vyvedené do vedlejšího temperačního kanálu, cirkuluje tedy obvykle chladnější voda. Pro vzájemné porovnání obou způsobů temperace tvarové vložky bylo nutné zajistit, aby technologické podmínky vstřikování, zejména teplota formy, byly konstantní. Vzhledem ke skutečnosti, že pevná i pohyblivá část formy je při standardním řešení temperačního systému chlazena cirkulující vodou ve společném temperačním okruhu (*prostřednictvím společného temperačního agregátu*), bylo nutné ponechat teplotu cirkulující vody na hodnotách 30 °C, resp. 45 °C a 60 °C. Tímto způsobem bylo zajištěno chlazení pevné části formy cirkulující vodou za stejných podmínek jako při konvenčním způsobu temperace formy, zatímco chlazení monitorované tvarové vložky v pohyblivé části formy bylo řešeno vzájemnou kombinací tepelné trubice a cirkulující vody v oblasti její kondenzační části. Tento způsob řešení významně ovlivňuje požadavky na minimální délku trubice obtékané vodou, neboť při zachování stejných teplotních podmínek temperace pohyblivé i pevné části formy nebylo možné snižovat teplotu cirkulující vody v oblasti kondenzační části trubice (*s ohledem na společný temperační okruh pevné a pohyblivé části formy*). Pro přenos tepla uvolněného z taveniny plastu do temperačního systému v kondenzační části tepelné trubice je tak zapotřebí se snižující se teplotou formy a temperačního média zvětšit délku nebo velikost teplosměnné plochy trubice v kondenzační části. Konstrukční řešení formy, resp. konstrukce hlavního temperačního kanálu s cirkulující vodou v upínací desce pohyblivé části formy však toto řešení neumožnilo. Maximální délka tepelné trubice obtékaná vodou, které bylo možné využít, je 12 mm. Toto provedení vyhovuje pouze podmínkám

temperace ocelové nebo měděné tvarové vložky při teplotě 60 °C (viz kap. 4.1.2.2). Při nižších teplotách temperace formy (30 °C a 45 °C) bylo možné očekávat omezený přenos tepla z taveniny plastu do temperačního systému formy v kondenzační části tepelné trubice a to na základě kontrolního výpočtu tepelných poměrů při chlazení tvarové vložky tepelnou trubicí, viz kap. 4.1.2.2. S ohledem na výzkum vlivu tepelného výkonu kapilární trubice na morfologii a mechanické vlastnosti výstřiku bylo provedeno experimentální měření i za podmínek temperace formy s cirkulující vodou o teplotě 30 °C a 45 °C (při stejné délce kondenzační části tepelné trubice vyvedené do kanálu s cirkulující vodou).



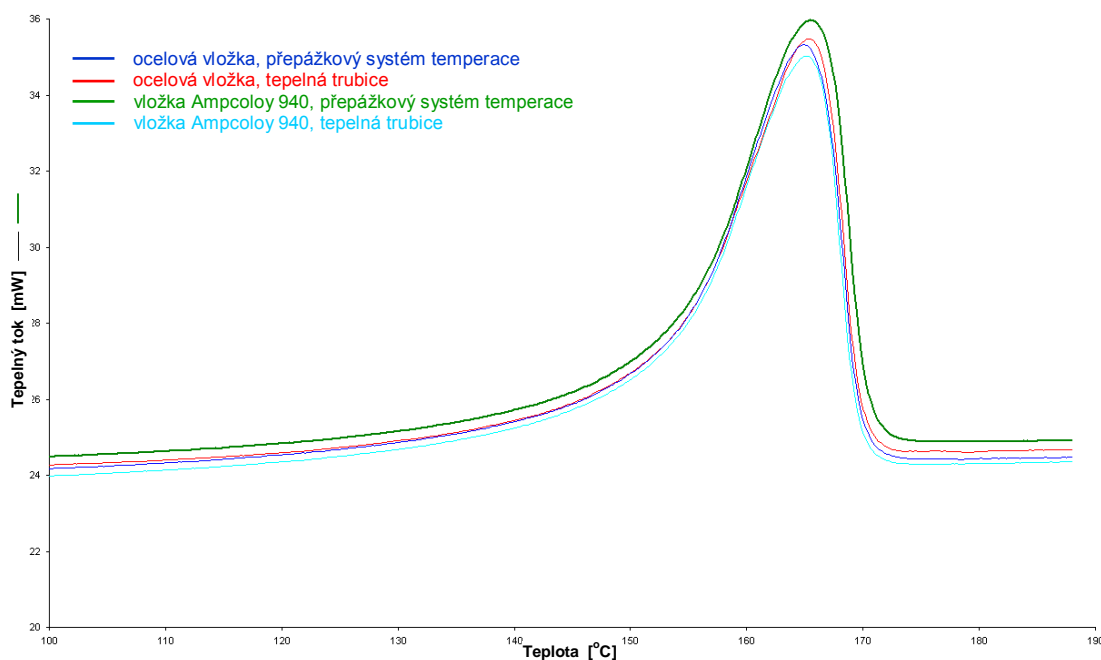
**Obr. 8.13** Průběh teploty v místě styku tepelné trubice přilehlé k ploše tvárníku (bod A)  
1- stěna tvarové vložky; 2- tepelná trubice; 3- tepelný spoj

Z grafických záznamů teplotních polí ve sledovaných místech vstřikovací formy v oblasti stírací a kotevní desky (viz obr. 5.16 až obr. 5.18, str. 100) je zřejmé, že zejména při nižších teplotách temperace formy dosahují teploty vyšších hodnot oproti standardnímu způsobu temperace tvarové vložky přepážkovým systémem chlazení. Tato skutečnost je ovlivněna tepelným výkonem kapilární trubice v důsledku nevhodné délky smáčené části trubice při nižších teplotách temperace, resp. nižším množstvím předaného latentního výparného tepla do temperačního systému formy s cirkulující vodou. Záznamy teplotních polí poukazují na skutečnost, že část tepla uvolněného taveninou plastu tak přechází do ostatních dílů pohyblivé části formy - stírací a upínací desky. Při aplikaci tvarové vložky

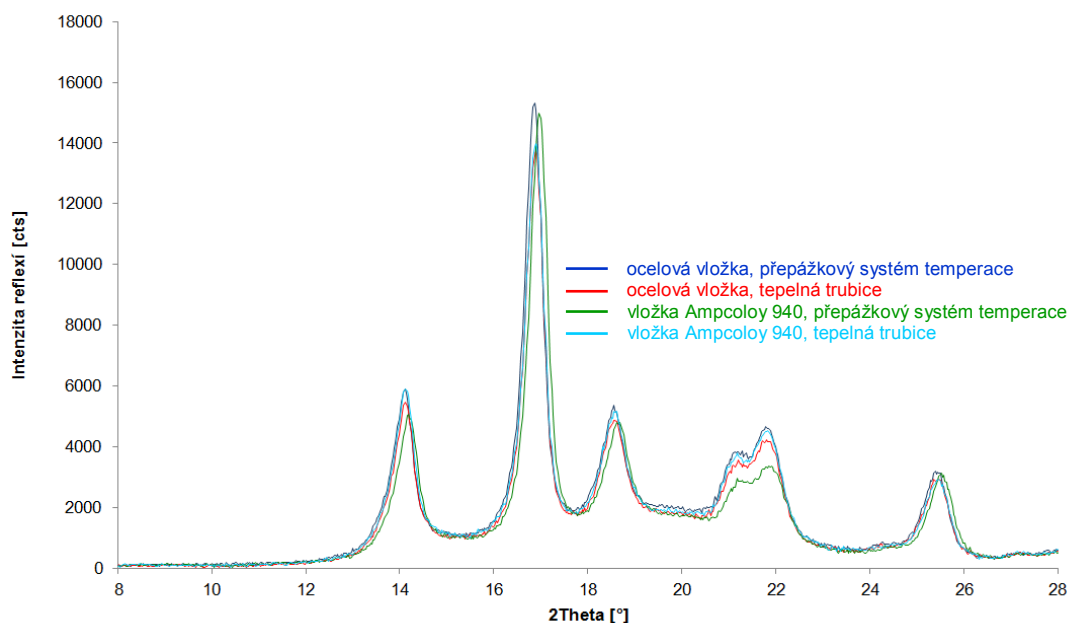


z vysoce tepelně vodivého materiálu Ampcoloy 940 je vzhledem k jeho teplotním a fyzikálním vlastnostem dosaženo rychlejšího a intenzivnějšího odvodu tepla z taveniny plastu. Přenos tepla z výparné části trubice je zahájen v kratším čase, viz obr. 8.13. Na obrázku je znázorněn průběh teploty v místě styku tepelné trubice přilehlé k ploše tvarové vložky tvárníku a to v oblasti jejího vrcholu, tedy v bodě A, přičemž teplota  $T_1$  představuje teplotu zahájení činnosti tepelné trubice. Materiál tvárníku se v místě A začne ohřívat tak, jak je do dutiny formy vstříknuta tavenina plastu. Pro zjednodušení lze předpokládat, že zdrojem tepla je místo s označením B. V případě ocelové vložky tvárníku je doba pro dosažení teploty  $T_1$  (tj. teploty v místě styku tepelné trubice s plochou tvarové vložky) delší než v případě vložky ze slitiny mědi (materiálu s vyšší tepelnou vodivostí). Body X a Y tak představují počátek činnosti tepelné trubice.

Na základě přímého i nepřímého stanovení stupně krystalinity výstřiku (metodami DSC a XRD, viz příklady na obr. 8.14 a obr. 8.15) lze uvést, že aplikace tepelné trubice významně neovlivnila entalpické přeměny ve fázi tání materiálu, resp. obsah krystalického podílu ve struktuře polypropyleny (viz tab. 6.2 a tab. 6.3, str. 108 a str. 110). Případné změny mechanických vlastností (viz obr. 8.16 až obr. 8.19) tak mohou být odrazem rozdílů ve vnitřní struktuře výstřiků, resp. její povrchové vrstvy, neboť jak již bylo diskutováno v kap. 8.1 je vnitřní (sférolitické) jádro ovlivněno vysokou rychlostí nukleace vlivem heterogenních zárodků v polypropyleny (nukleantů).

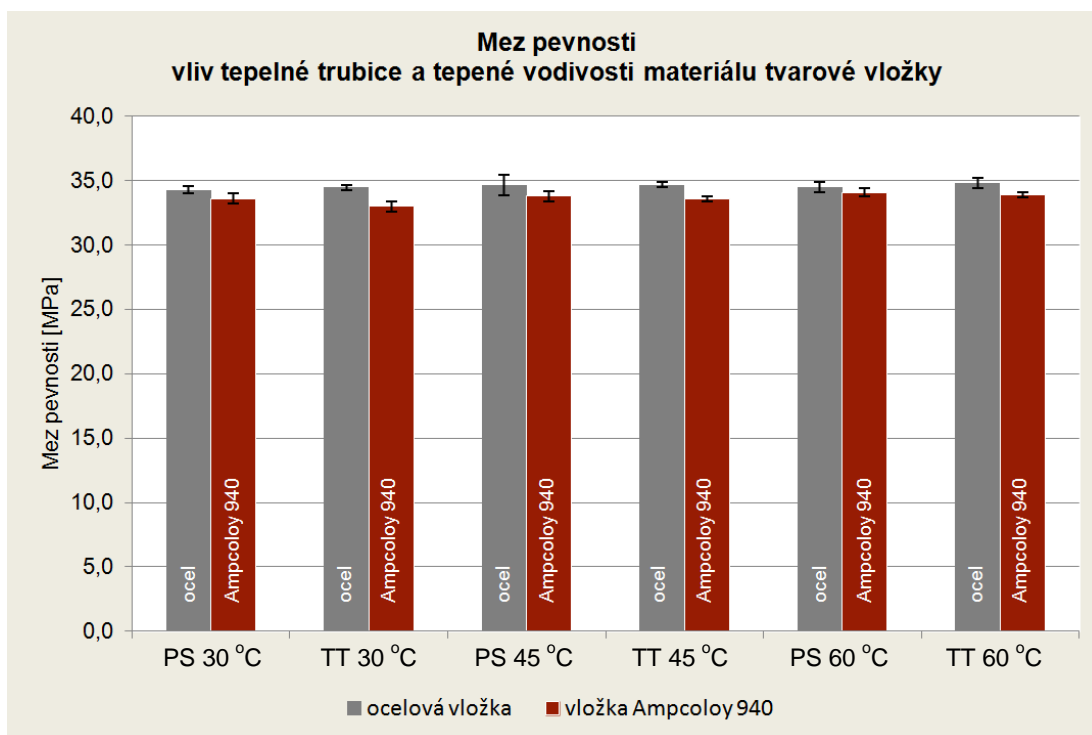


**Obr. 8.14** Entalpická přeměna tání pro PP výstřik Mosten MT 230 při aplikaci přepážkového systému temperace a tepelné trubice ( $T_{tm} = 45^\circ\text{C}$ )

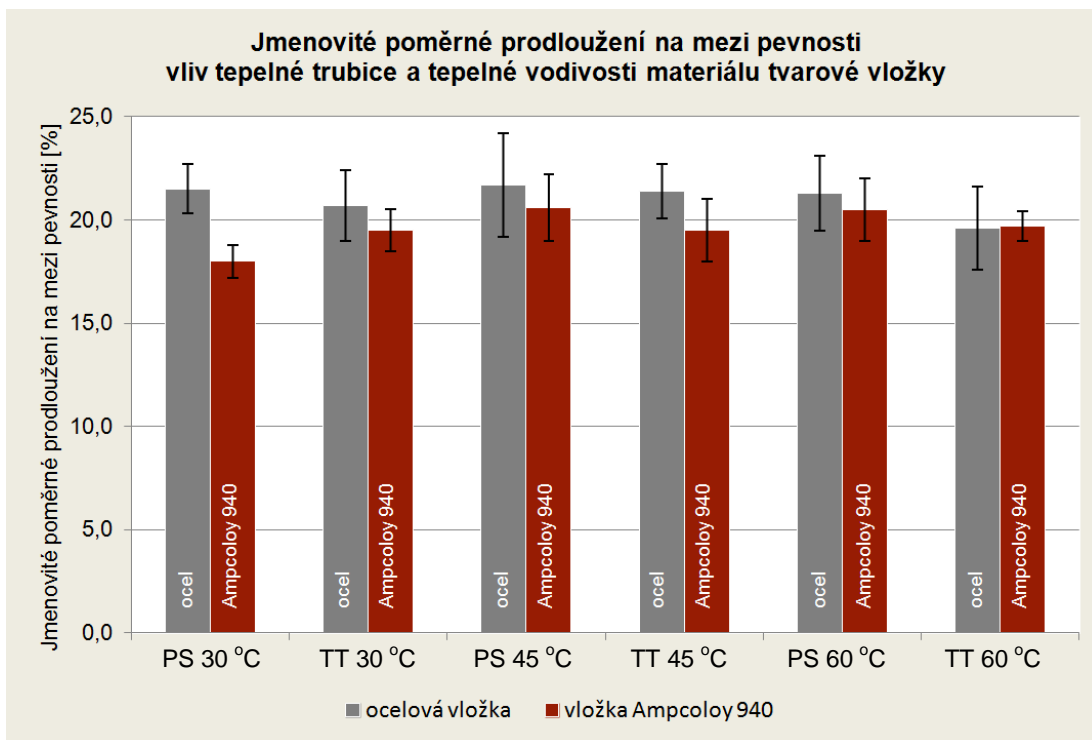


**Obr. 8.15** Difraktogram pro PP výstřik Mosten MT 230  
při aplikaci přepážkového systému temperace a tepelné trubice ( $T_{tm} = 45^{\circ}\text{C}$ )

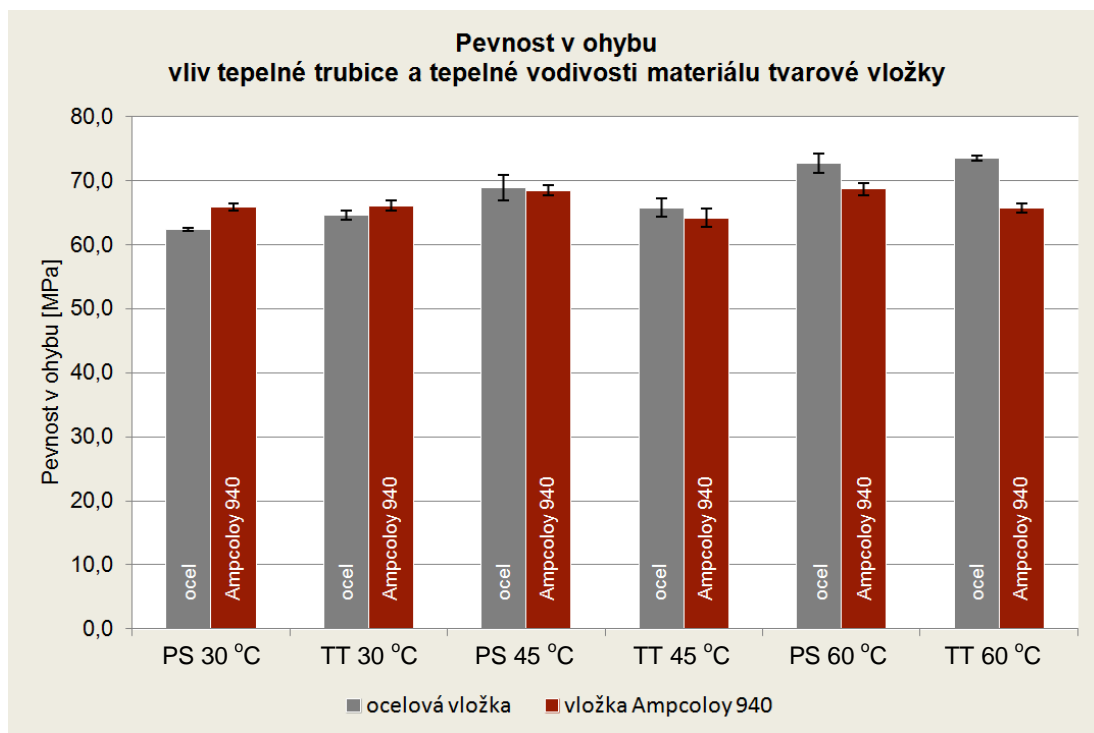
Při hodnocení mechanických vlastností výstřiků (viz obr. 8.16 až obr. 8.19) lze konstatovat, že vzhledem k standardnímu temperačnímu systému s plochou přepážkou neměla aplikace tepelné trubice pro chlazení ocelové nebo měděné tvarové vložky negativní vliv na mechanické vlastnosti výstřiků (při stejném materiálu tvarové vložky), jako je jejich mez pevnosti, jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti a pevnost v ohybu (vzhledem k velmi jemné sférolitické struktuře). Toto konstatování je opřeno o statistické zhodnocení výsledků prostřednictvím směrodatných odchylek a 95 % intervalu spolehlivosti, určeného za předpokladu Studentova rozdělení (*t-rozdělení*). Všechny změny jsou pod hranicí statistické významnosti a jejich odchylky zdaleka nepřesahují hranici 10 %. Při hodnocení je třeba mít na zřeteli skutečnost, že vlastnosti výstřiků jsou při jejich stanovení ovlivněny přesností přístroje, homogenitou vzorku, podmínkami okolí, způsobem přípravy zkušebních těles, subjektivní chybou operátora, apod.



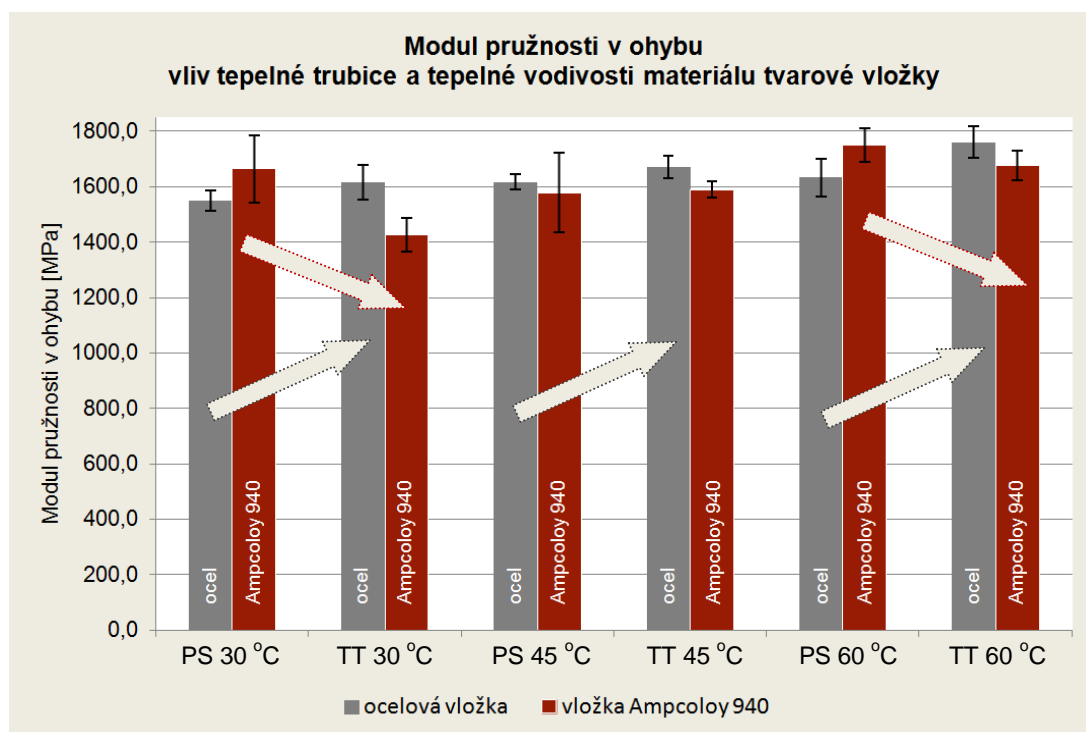
**Obr. 8.16** Mez pevnosti výstřiků PP Mosten MT 230 při aplikaci tepelné trubice  
PS- přepážkový systém temperace, TT- tepelná trubice



**Obr. 8.17** Jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti PP výstřiků Mosten MT 230  
při aplikaci tepelné trubice  
PS- přepážkový systém temperace, TT- tepelná trubice



**Obr. 8.18** Pevnost v ohybu PP výstřiků Mosten MT 230 při aplikaci tepelné trubice  
PS- přepážkový systém temperace, TT- tepelná trubice

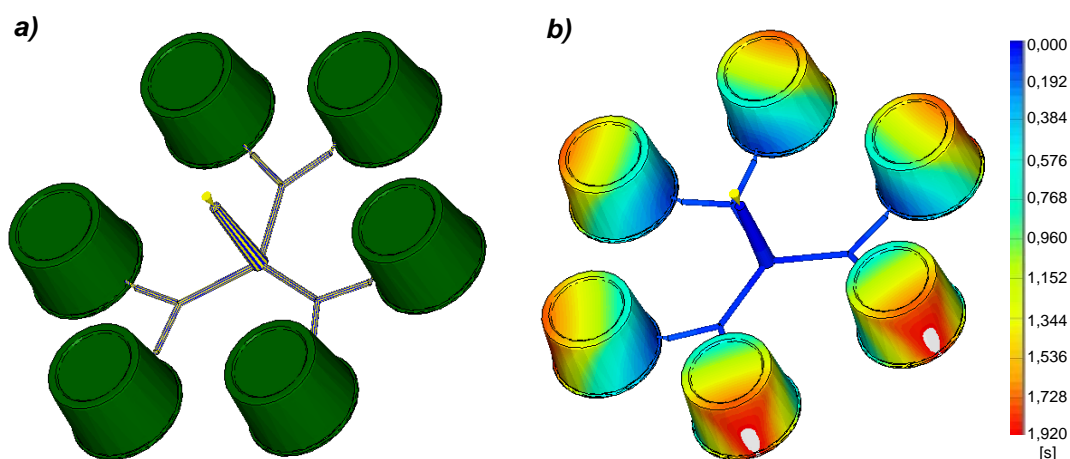


**Obr. 8.19** Modul pružnosti v ohybu PP výstřiků při aplikaci tepelné trubice  
PS- přepážkový systém temperace, TT- tepelná trubice

V případě modulu pružnosti v ohybu lze na základě naměřených hodnot a jejich směrodatných odchylek, resp. intervalu spolehlivosti konstatovat, že jeho změny jsou v důsledku aplikace tepelné trubice minimální a to mnohdy pod nebo na samé hranici statistické významnosti. Z obr. 8.19 je patrný náznak, že v případě ocelové tvarové vložky dochází po aplikaci tepelné trubice k nárůstu modulu pružnosti (*pro přesnější statistické zhodnocení by bylo vhodné zvětšit soubor měřených dat*). Přestože v případě nukleovaných polymerů nelze toto experimentálně prokázat, lze na základě teoretického rozboru usuzovat, že příčinou může být pokles celkové povrchové vrstvy ve struktuře výstřiku (*včetně vrstvy smykové*) v důsledku omezeného přenosu tepla vlivem poddimenzované délky trubice v kondenzační části vyvedené do chladicího kanálu s cirkulující vodou. Například RŮŽIČKA [16] uvádí, že v případě výroby výstřiků z polypropylenů za podmínek minimalizující vznik smykové vrstvy (*molekulární orientace může před krystalizací dostatečně relaxovat*) vykazují tyto lepší mechanické vlastnosti. Vzhledem k přidavku nukleačních činidel v polypropylenů (*urychlující krystalizaci*) je předpoklad, že relaxace molekulové orientace před krystalizací bude menší, než u neplněných polypropylenů, kde by omezený přenos tepla tepelnou trubicí mohl mít výraznější vliv na hodnoty modulu pružnosti. Tento předpoklad bude vhodné podrobit výzkumu v další etapě, navazující na tuto práci. Obdobná tendence změny ohybového modulu pružnosti platí také pro materiál tvarové vložky Ampcoloy 940 (*zejména při teplotě temperace formy 30 °C, odpovídající rychlému chlazení*), kdy naopak modul pružnosti v ohybu se zavedením tepelné trubice klesá, neboť v případě vysoce tepelně vodivého materiálu je dosaženo intenzivnějšího sdílení tepla z taveniny plastu do tvarové vložky a tím dochází i k předpokládanému nárůstu smykové vrstvy výstřiku (*molekulová orientace nemůže před krystalizací dostatečně relaxovat*). S ohledem na tenkostěnnou povahu výstřiku a jeho rychlé chlazení, byť za použití dvou odlišných temperačních prostředků (*tepelné trubice nebo cirkulují vody v temperačním kanálu*) a především vzhledem k přítomnosti nukleantů, lze na základě rozboru krystalizace polymerů usuzovat na podobné struktury jádra u těchto výstřiků (*zejména při nižších teplotách temperace*). Jedinou proměnnou v případě nízkých teplot temperačního média, při tenkostěnné povaze výstřiku a v důsledku cizorodých částic (*nukleantů*) dispergovaných v materiálu, tak zůstává tloušťka celkové povrchové vrstvy výstřiku (*včetně smykové*), s níž se může měnit modul pružnosti. U nenukleovaných polypropylenů (*polymerů obecně*) může docházet nejen k rozdílné relaxaci molekulární orientace před krystalizací, ale projeví se zde pravděpodobně i vlivy mikrostrukturní podoby sférolitického jádra vstříkovaného dílu.

## 8.4 Vliv temperačních systémů formy na tokové vlastnosti taveniny polymeru

Rychlost chlazení taveniny má praktický dopad na její reologické, tokové vlastnosti ve fázi plnění dutiny formy, které jsou předurčeny strukturou materiálu, rychlostí vstřikování, vstřikovacím tlakem, ale také geometrií výstřiku a konstrukcí vstřikovací formy, včetně jejího účinného odvodu tepla. Při nevhodném odvodu tepla vstřikovací formy a teplotě taveniny, která se v důsledku zvýšeného odvodu tepla z tvarových částí formy snižuje, se uzavřený vzduch soustřeďuje v místech výstřiku na protilehlé straně od ústí vtoku (viz obr. 8.20). V místě uzavřeného vzduchu dochází k místnímu nedotečení taveniny (*výstřik není úplný*) a vzhledem k charakteru plnění dutiny formy taveninou plastu také ke vzniku studeného spoje (*oblast spojování ochlazeného proudu taveniny*). V místě studeného spoje, který se současně projevuje jako vzhledová vada, dochází v praxi k výraznému zhoršení mechanických vlastností výstřiků (*v závislosti na materiálu polymeru*) a to zejména se snižující se tloušťkou jejich stěny nebo u plněných materiálů v důsledku rozdílné orientace plniva v daném místě.

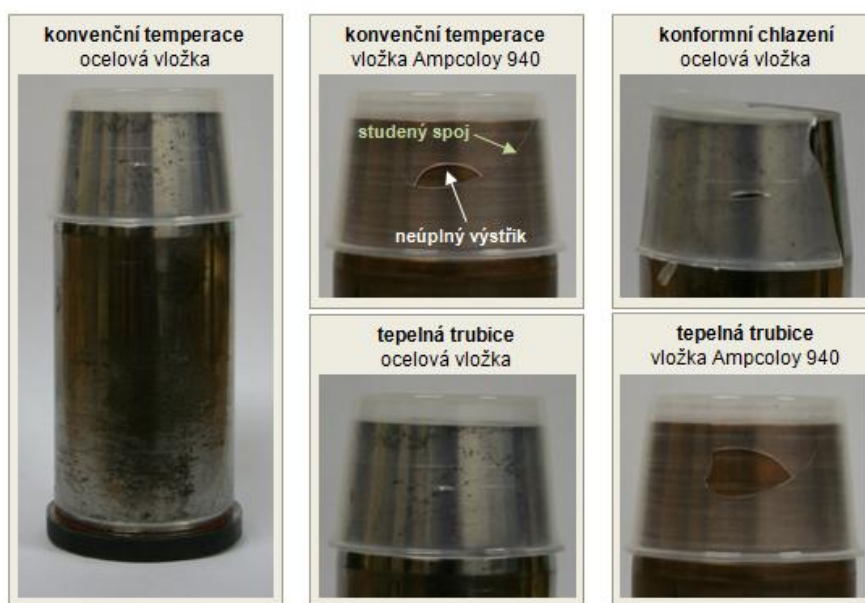


**Obr. 8.20** Vtoková soustava vstřikovací formy

a) model vtokové soustavy s tunelovým ústím vtoku,  
b) časový průběh toku taveniny v dutině formy s oblastí uzavřeného vzduchu

Vliv rychlosti chlazení na tokové vlastnosti taveniny polypropyleny v důsledku změny temperačního systému je zřetelný z obr. 8.21 (*ostatní technologické parametry vstřikování: teplota, tlak, rychlost, okamžik přepnutí vstřikovacího tlaku na dotlak a doba, byly konstantní*). Z obr. 8.21 je zřejmé, že aplikací vysoce tepelně vodivých materiálů na bázi mědi dochází v důsledku zvýšeného odvodu tepla z taveniny k zvyšování její viskozity a nebezpečí vzniku neúplných výstřiků, včetně studených spojů (*zejména při špatném odvodu tepla formy*), viz příklad aplikace tvarové vložky ze slitiny Ampcoloy 940. Při apli-

kaci konformního chlazení jsou tokové vlastnosti taveniny a velikost oblasti s uzavřeným vzduchem ovlivněny způsobem cirkulace média ve dvou kanálech po obvodu tvarové vložky s rozdílnou jeho teplotou. V případě aplikace tepelné trubice a ocelové tvarové vložky lze konstatovat, že oblast nevyplněného prostoru ve stěně výstřiku (*v důsledku uzavřeného vzduchu*) se nezvětšovala a to patrně vzhledem k tepelnému výkonu a časové prodlevě v zahájení činnosti tepelné trubice, popisované v kap. 8.3.2. Uvedené faktory příznivě působily na tokové vlastnosti taveniny polypropylenu ve fázi plnění dutiny formy taveninou plastu. V případě aplikace tepelné trubice a tvarové vložky s vyšší tepelnou vodivostí došlo naopak v důsledku rychlého odvodu tepla z tvarové dutiny formy k poklesu tokových vlastností taveniny polymeru, které mají za následek výrazný vznik neúplných výstřiků (*viz obr. 8.21*).



**Obr. 8.21** Vliv temperačního systému a tepelné vodivosti materiálu formy na tokové vlastnosti taveniny polypropylenu ( $T_m = 45^\circ\text{C}$ )

V případě, že změna tokových vlastností taveniny polymeru bude v důsledku rychlého odvodu tepla z tvarové dutiny formy negativně ovlivňovat kvalitu povrchu výstřiků, bude zapotřebí optimalizovat procesní parametry vstřikování ve fázi plnění, zejména vstřikovací rychlost (*včetně její profilace*) a okamžik přepnutí vstřikovacího tlaku na dotlak.

## 9 ZÁVĚR

Disertační práce se zabývá vlivem nekonvenčních způsobů temperace vstřikovacích forem na proces chlazení tenkostěnných polypropylenových výstřiků. Temperace je velmi důležitý prvek v konstrukčním provedení vstřikovací formy, neboť souvisí s problematikou sdílení tepla mezi taveninou plastu a nástrojem [3-5, 36], resp. jeho temperačním systémem a významně se tak podílí na konečné kvalitě polymerních výstřiků, zejména jejich struktuře, vlastnostech, tvarové a rozměrové přesnosti [16, 18]. Také tloušťka stěny výstřiku ve vztahu k rychlosti chlazení, vytváření morfologické struktury [16, 23, 24], vzniku reziduálních napětí [18, 19], apod. zaujímá významnou úlohu v procesu sdílení tepla ve fázi chlazení a tuhnutí taveniny během technologického procesu vstřikování.

Technologie vstřikování je proces diskontinuální, cyklický, při kterém je plast vystaven anizotermickému tváření a kdy se na povrchu tvarové dutiny formy i výstřiku vytváří nehomogenní teplotní pole, které společně s rychlostí chlazení spoluvytváří morfologii výstřiku. V technické praxi se lze "paradoxně" setkat s dvěma odlišnými případy k přístupu rychlosti sdílení tepla taveninou plastu. Například v případě tlustostěnného výstřiku, kdy tavenina v dutině formy tuhne příliš dlouho a v důsledku zatuhnutí taveniny v oblasti ústí vtoku již nelze kompenzovat jeho objemové změny, je žádoucí, aby odvod tepla z výstřiku probíhal intenzivněji a to i ve vztahu k ekonomické délce výrobního cyklu. Zcela opačný případ však může nastat u technologie mikrovstřikování (*vstřikované součásti se vyznačují nižším poměrem plochy k objemu tělesa*) [16, 23, 24], kde je proces zatížen značnými smykovými silami a prudkým chlazením výstřiků s negativním vlivem na jejich strukturu i kvalitu. V takovémto případě může být naopak výhodné, úpravou (*změnou*) temperačního systému formy, prodloužit dobu chlazení, resp. snížit účinnost odvodu tepla. Pro oba uvedené případy může být odpovídající alternativou změna materiálu tvarových vložek, resp. změna jejich tepelné vodivosti. V běžném procesu vstřikování termoplastů jsou materiály s rozdílnou tepelnou vodivostí pro konstrukci formy aplikovány především v případech nerovnoměrného odvodu tepla z výstřiku (*ve fázi chlazení*), kdy tvarové části, vymezující tvarovou dutinu formy, jsou vložkovány vysoce tepelně vodivými materiály. K odvodu tepla z tvarových částí formy je ovšem v technické praxi možné aplikovat i jiné nekonvenční temperační prostředky (*s ohledem na konstrukční možnosti výstřiku a formy*), které nahrazují nebo doplňují konvenční způsob chlazení cirkulující vodou v temperačních kanálech a disertantem jsou uvedeny např. pod odkazem [20].

V rámci experimentálního výzkumu vlivu vybraných nekonvenčních způsobů temperace vstřikovacích forem na proces chlazení polypropylenových výstřiků byly použity tem-



peráční systémy, které jsou v praxi používány k zajištění vyšší intenzity odvodu tepla z taveniny plastu ve fázi chlazení. Jedná se o temperační systémy na bázi vysoce tepelně vodivých materiálů, cirkulující vody v temperačních kanálech tzv. konformního chlazení nebo tepelné trubice, které lze použít i pro případy, u nichž není z konstrukčního hlediska formy možné aplikovat konvenční temperační systém s cirkulující vodou v kanálech. Z obdobného hlediska byl v experimentální části aplikován také horký vzduch. Na základě experimentálního výzkumu lze konstatovat následující poznatky, spojené s fyzikálně tepelnými vlastnostmi materiálu tvarových částí formy, temperačního média, ale také se změnou geometrického faktoru temperačních kanálů a temperačního prostředku:

- Aplikací vysoce tepelně vodivých materiálů na bázi mědi (*Moldmax HH a Ampcoloy 940*) pro vodou chlazené tvarové vložky byl potvrzen zvýšený odvod tepla z tvarové dutiny formy ve fázi chlazení výstřiku. Jejich použití příznivě ovlivnilo homogenitu teplotních polí v nástroji. Tato skutečnost bude pozitivně působit na homogenitu vlastností výstřiků i jejich tvarovou a rozměrovou přesnost. Pro konkrétní geometrii výstřiku a temperační systém formy bylo v rámci experimentálního výzkumu zaznamenáno zrovnoměnění teplotního pole formy ve sledovaných oblastech a to v rozmezí  $(10 \div 30) \%$  v závislosti na teplotě temperace. Nejvyšší míry homogenity teplotních polí ve formě bylo dosaženo při nejnižší teplotě temperace tvarové vložky  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Z rozboru uvedené problematiky je zřejmé, že vyšší míra homogenity přispěje k eliminaci nerovnoměrného smršťování hmoty, vnitřních vad výstřiků (*v důsledku stejnoměrného smrštění materiálu a účinného působení dotlaku*), ale také například k potlačení velikosti teplotně reziduálních napětí ve výstřiku.
- Aplikací vysoce tepelně vodivých materiálů pro konstrukci tvarových vložek nedošlo při vstřikování nukleanty plněného polypropylenu k nežádoucí změně pevnostních charakteristik výstřiků. Také obsah krystalického podílu ve struktuře materiálu nezaznamenal vlivem rozdílné tepelné vodivosti materiálu tvarové vložky vstřikovací formy žádných změn. Na základě rozboru uvedené problematiky lze předpokládat, že vnitřní povrchová vrstva struktury tenkostěnných výstřiků je rozhodujícím způsobem ovlivněna rychlostí chlazení v důsledku malé tloušťky stěny výstřiku, než změnou materiálu tvarové vložky formy (*na základě rešerše však toto nebude platit pro případy tlustostěnných dílů*). Obdobně sférolitická vrstva v jádře výstřiku je u nukleanty plněného polypropylenu rozhodujícím způsobem určena jejich přítomností, zatímco u polypropylenů bez nukleačních činidel bude odrazem rychlosti chlazení (*tedy i v důsledku změny tepelné vodivosti materiálu formy*), tak jak je zřejmé ze studií RŮŽIČKY [16], JUNGMEIERA [23] a MEISTERA [24].

- Použitím horkého vzduchu k temperaci tvarových částí formy (*na rozdíl od cirkulující vody*) nebylo na základě měření teplotních profilů v oblasti tvarové vložky dosaženo ustáleného teplotního pole (*vzhledem k jeho tepelným vlastnostem*), které by zajistilo reprodukovatelnost kvality výstřiků v jednotlivých cyklech výrobního procesu.
- Aplikací tvarové vložky s konformním způsobem chlazení (*zhotovené metodou „DMLS“*) lze zajistit nejen rychlý odvod tepla z tvarové dutiny formy, ale především homogenní teplotní pole v nástroji. U tohoto způsobu temperace tvarové vložky bylo zaznamenáno nejvýraznějšího zrovnoměnění teplotního pole v nástroji, které v podmínkách experimentu dosahovalo až 42 % pro případ nejnižší teploty temperace tvarové vložky (30 °C).
- Při hodnocení mechanických vlastností polypropylenových výstřiků, zhotovených ve formě s konformním chlazením, byl zaznamenán pokles modulu pružnosti v ohybu (*na rozdíl od meze pevnosti, jmenovitého poměrného prodloužení na mezi pevnosti a pevnosti v ohybu*). Vzhledem k minimální změně obsahu krystalického podílu ve struktuře výstřiků (*pod hranicí statistické významnosti*) lze předpokládat, že příčinou je molekulární orientace v povrchové vrstvě výstřiku (*v důsledku rychlého chlazení*). Intenzita odvodu tepla z výstřiku tak bude významně ovlivňovat povrchovou, resp. celkovou povrchovou vrstvu jeho vnitřní struktury a konečné vlastnosti dílů (*zejména tuhost*).
- Aplikací tepelné trubice k temperaci tvarové vložky vstřikovací formy je umožněn přenos tepla z oblasti tvarové dutiny formy do oblasti kondenzační části trubice, která byla vyvedena do temperačního kanálu s cirkulující vodou (*temperačním médiem*). Tepelný výkon trubice je ovlivněn celou řadou faktorů, které jsou uvedeny v rešeršní části disertační práce, ale také v kapitole diskuse výsledků. V rámci experimentálního měření se jako významný parametr ukázala délka, resp. plocha kondenzační části tepelné trubice smáčená vodou. Se snižující se délkou trubice smáčené vodou, resp. se snižující se teplotou temperace (*při konstantní délce trubice smáčené vodou*) byl zaznamenán omezený přenos tepla z taveniny plastu, resp. tvarové vložky vstřikovací formy do temperačního systému v kondenzační části tepelné trubice. Záznamy teplotních polí poukázaly na skutečnost, že část tepla uvolněného taveninou plastu přechází do ostatních dílů pohyblivé části formy - stírací a upínací desky. Výsledky studia struktury (*obsahu krystalického podílu*) polypropylenových výstřiků s nukleačními činidly a jejich mechanické vlastnosti, jako jsou mez pevnosti, jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti a pevnost v ohybu, poukazují na skutečnost, že tyto nebyly negativně ovlivněny v důsledku omezeného přenosu tepla. Pokud jde o vliv tepelného výkonu tepelné trubice na modul pružnosti v ohybu

u polypropylenových výstřiků, je jeho změna s ohledem na rozptyl měřených hodnot na hranici statistické významnosti. V případě ocelové tvarové vložky je na základě grafického zhodnocení ohybového modulu pružnosti výstřiku v závislosti na podmínkách a způsobu temperace náznak jeho nárůstu při aplikaci tepelné trubice. Vzhledem k rešeršním poznatkům lze předpokládat, že omezený přenos tepla z výstřiku minimalizuje vznik smykové vrstvy v jeho struktuře, tzn. že molekulární orientace může před krystalizací dostatečně relaxovat. V případě nukleovaných polypropylenů (*nukleační činidla urychlují krystalizaci*) je relaxace molekulové orientace před krystalizací menší, než u neplněných polypropylenů, kde by změna hodnot modulu pružnosti mohla být výraznější. Obdobná změna ohybového modulu pružnosti byla zaznamenána také v případě tvarové vložky z materiálu Ampcoloy 940, kdy naopak modul pružnosti se zavedením tepelné trubice klesá v důsledku vyšší tepelné vodivosti materiálu a intenzivnějšího sdílení tepla z taveniny plastu do tvarové vložky, neboť lze předpokládat nárůst smykové vrstvy výstřiku.

- Aplikací temperačních systémů, směřujících k intenzivnějšímu sdílení tepla z tvarových dutin vstřikovací formy, se bude zvyšovat viskozita taveniny plastu, která může negativně ovlivnit fázi plnění dutiny formy taveninou plastu i kvalitu výstřiku. Tomuto následnému jevu lze předcházet úpravou procesních parametrů ve fázi plnění, zejména velikostí a profilací vstřikovací rychlosti, popřípadě okamžikem přepnutí vstřikovacího tlaku na do-tlak.

## 9.1 Doporučení pro další směřování výzkumu

Disertační práce je jen určitým příspěvkem k řešené problematice, která se vztahuje k nukleovaným polypropylenům. Výsledky výzkumu naznačily některé problémy, které se stanou předmětem další výzkumné činnosti. Přestože homogenní nukleace je v praxi velmi ojedinělá, bylo by vhodné na daný výzkum navázat aplikací polypropylenů bez dispergovaných příměsí ve struktuře, které významně ovlivňují jejich krystalizaci. Tento směr však předpokládá zhotovení nové vstřikovací formy s rozměry tvarové dutiny a vtokové soustavy odpovídající tokovým vlastnostem předem zvoleného polypropylenu, který umožní studium vnitřní struktury výstřiků na jeho povrchu i v jádře. Vzhledem k diskusi získaných výsledků je zřejmé, že na kvalitě výstřiků se významně podílí jejich povrchová a smyková vrstva ve vnitřní struktuře, která ovlivňuje jejich konečné mechanické vlastnosti, např. modul pružnosti. Při návrhu nové formy, resp. geometrie výstřiku by bylo vhodné, aby jeho tvar umožnil sledovat a hodnotit i další mechanické vlastnosti, které mohou být odrazem jeho vnitřní struktury v závislosti na způsobu a podmínkách temperace vstřikovací formy (*zejména tažnost a rázovou houževnatost*).

Také sledování teplotních polí mimo oblast tvarové dutiny formy neposkytlo úplné výsledky spojené s hodnocením intenzity odvodu tepla z výstřiků. Pro tento záměr by bylo vhodné při konstrukci nové vstřikovací formy integrovat do tvarových částí, vymezující tvarovou dutinu formy, termovizní čidla, která umožní sledovat časovou závislost teploty taveniny přímo v tvarové dutině formy a na základě těchto výsledků stanovit nejen míru homogenity teplotních polí výstřiků, ale především intenzitu odvodu tepla a vzhledem k možné optimalizaci doby chlazení výstřiků během procesu vstřikování také časovou úsporou doby cyklu.

V případě aplikace vírové trubice k temperaci tvarových částí formy bude pro další samostatný směr výzkumu vhodné využít studeného konce vírové trubice a to zejména v tzv. impulsním provedení, kdy bude vzduch přiváděn do tvarových částí formy v časových intervalech, např. v okamžiku zaplnění tvarové dutiny formy taveninou plastu. Je zřejmé, že aplikace vzduchu má možné uplatnění jen v případech tzv. lokální temperace *(v místech výstřiku s výraznou nehomogenitou teplotního pole, kde nelze využít temperační kanály s cirkulující vodou)*, tedy jako doplněk k běžnému konvenčnímu temperačnímu systému. V rámci této etapy bude vhodné aplikovat Ranque-Hilsch vírovou trubicí pro temperaci jednonásobné vstřikovací formy, která odstraní nedostatky stávajícího výzkumu, kdy stlačeným vzduchem byla chlazena pouze monitorovaná tvarová vložka, zatímco ostatní vložky, resp. tvarové části byly chlazeny jen cirkulující vodou v temperačních kanálech pevné části formy. Tímto způsobem byla pohyblivá část formy neúměrně teplotně zatěžována.

## 9.2 Vlastní přínos práce

Práce shrnuje a rozšiřuje poznatky v oblasti aplikace nekonvenčních způsobů temperace vstřikovacích forem ve vztahu k technologickému procesu vstřikování a chlazení tenkostěnných polypropylenových výstřiků s obsahem nukleačních činidel.

V případech aplikace vysoce tepelně vodivých slitin na bázi mědi a konformního způsobu chlazení potvrzují výsledky experimentálního měření intenzivní sdílení tepla z tvarové dutiny formy zaplněné taveninou plastu. Na základě teplotních profilů vstřikovací formy lze uvést, že oba uvedené způsoby temperace tvarových vložek příznivě ovlivní homogenitu teplotních polí v nástroji i na povrchu výstřiku. Tato skutečnost bude v souladu s rozбором uvedené problematiky mít přímý pozitivní vliv na kvalitu výstřiků, zejména homogenitu jejich vlastností, rovnoměrné smrštění, minimalizaci reziduálních napětí a rozměrovou i tvarovou přesnost.

Při aplikaci vysoce tepelně vodivých materiálů nebyl u výstřiků z nukleovaného polypropylenu shledán negativní vliv na jejich sledované mechanické vlastnosti. Předností tohoto systému tak může být rychlý odvod tepla z nástroje, zachování obsahu krystalického podílu ve struktuře výstřiku (*ovlivněného přídavkem nukleantů*) a stálost jejich mechanických vlastností (*zejména pevnosti a modulu pružnosti*).

Omezený přenos tepla tepelnou trubicí z ocelové vložky vstřikovací formy (*v důsledku poddimenzované délky, resp. velikosti teplosměnné plochy trubice v její kondenzační části*) neovlivnil strukturu, ani sledované vlastnosti výstřiků. Naopak při vzájemné aplikaci tepelné trubice a tvarové vložky z vysoce tepelně vodivého materiálu bude zejména při nižších teplotách temperace ovlivněn ohybový modul pružnosti výstřiku, jehož hodnota se s rychlým chlazením snižuje v důsledku pravděpodobného nárůstu smykové vrstvy ve struktuře výstřiku, kdy molekulová orientace nemůže před krystalizací dostatečně relaxovat.

V rámci řešení experimentálního výzkumu bylo zjištěno, že u nukleovaných polypropylenových výstřiků nedošlo aplikací uvedených temperačních prostředků, resp. intenzitou jejich chlazení, k negativnímu vlivu na výsledný obsah krystalického podílu ve struktuře. Zvýšený odvod tepla z taveniny polymeru (*v důsledku intenzifikace chlazení tvarové vložky nekonvenčními temperačními prostředky*) ovlivňuje ohybový modul pružnosti výstřiku (*pravděpodobně vlivem molekulární orientace v jeho povrchové vrstvě*) a tokové vlastnosti taveniny plastu, zvyšováním její viskozity. Ostatní sledované mechanické vlastnosti výstřiků: mez pevnosti, pevnost v ohybu a jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti nebyly ovlivněny. V případě tokových vlastností bude třeba optimalizovat technologické parametry procesu vstřikování, zejména vstřikovací rychlost a okamžik přepnutí vstřikovacího tlaku na dotlak.



## PŘEHLED PUBLIKACÍ K DANÉ PROBLEMATICE

### **Kapitola v knize:**

- [1] BĚHÁLEK, Luboš. Speciální temperační prostředky. SOVA, Miloš et al. *Termoplasty v praxi*. Praha: Dashöfer, 1999-2004, s. 11. ISBN 80-86229-15-7.

### **Článek zařazený do světově uznávané databáze:**

- [2] BĚHÁLEK, Luboš a Jozef DOBRÁNSKY. Conformal Cooling of the Injection Moulds. *Applied Mechanics and Materials*. 2013, svazek 308, s. 127-132. ISSN 1660-9336. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.308.127.

### **Článek v recenzovaném časopise:**

- [3] BĚHÁLEK, Luboš a Josef DOBRÁNSKY. Process of Cooling Injection Mould and Quality of Injection Parts. *Acta Technica Corviniensis - Bulletin of Engineering (Annals of Faculty Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering)*. 2009, Fascicule 3, s. 19-23. e-ISSN 2067-3809.
- [4] BĚHÁLEK, Luboš, Jiří BOBEK a Lýdia SOBOTOVÁ. Morphology and Properties of Polypropylene Injection Parts by Application of Copper Alloy and Heat-Pipe for Tempering of Injection Moulds. *Acta Mechanica Slovaca*. 2008, roč. 12, č. 3-A/2008, s. 45-50. ISSN 1335-2393.
- [5] BĚHÁLEK, Luboš. Heat-Pipe and High-Conductivity Materials in Cooling System of Injection Mould. *Strojírenská technologie*. 2007, roč. XII, zvláštní číslo, s. 13-16. ISSN 1211-4162.
- [6] BĚHÁLEK, Luboš a Tomáš POUPA. Morphology of Polymeric Parts and their Physical-Mechanical Properties in Dependence on the Thermal Load of Mould. *Acta Mechanica Slovaca*. 2006, roč. 10, č. 2B/2006, s. 27-32. ISSN 1335-2393.
- [7] POUPA, Tomáš a Luboš BĚHÁLEK. Thermal Profile of Injection Mould with different Methods of Cooling. *Acta Mechanica Slovaca*. 2006, roč. 10, č. 2B/2006, s. 317-324. ISSN 1335-2393.
- [8] BĚHÁLEK, Luboš, Petr LENFELD, Aleš AUSPERGER a Tomáš POUPA. Temperace vstřikovacích forem s ohledem na vlastnosti a morfologii výstřiků. *Strojírenská technologie*. 2005, roč. X, zvláštní číslo, s. 9-13. ISSN 1211-4162.
- [9] POUPA, Tomáš, Luboš BĚHÁLEK, Petr LENFELD a Aleš AUSPERGER. Teplotní analýza vstřikovací formy při nekonvenčním způsobu temperování Ranque-Hilsch vírovou trubicí. *Strojírenská technologie*. 2005, roč. X, zvláštní číslo, s. 152-156. ISSN 1211-4162.
- [10] BĚHÁLEK, Luboš a Tomáš POUPA. Teplotní analýza vstřikovací formy při aplikaci Ranque-Hilsch vírové trubice. *Plasty a kaučuk*. 2005, roč. 42, č. 11-12, s. 6-10. ISSN 0322-7340.
- [11] BĚHÁLEK, Luboš a Petr LENFELD. Temperační systém s vysoce tepelně vodivým materiálem. *Plasty a kaučuk*. 2002, roč. 39, č. 7, s. 196-199. ISSN 0322-7340.

### **Článek ve sborníku konference:**

- [12] BĚHÁLEK, Luboš a Aleš AUSPERGER. Thermal Conditions of Injection Mould and Quality of Plastic Parts by use of Non-Conventional Cooling Methods. In: *International Conference on Military Technologies*. Brno, 2011, s. 8. ISBN 978-80-7231-787-5.



- [13] BĚHÁLEK, Luboš, Petr LENFELD, Josef PŮTA a Jiří HABR. Thermal Conditions of Injection Moulding during Cooling Phase of Injection Polymer Part in Relation to its Structure and Quality. In: *26th Annual Meeting of Polymer Processing Society (PPS-26)*. Banff (Canada), 2010, s. 5.
- [14] BĚHÁLEK, Luboš a Josef DOBRÁNSKY. Process of Cooling Injection Mould and Quality of Injection Parts. In: *New Trends in Technical Systems Operation*. Prešov, 2009, s. 4. ISBN 978-80-553-0312-3.
- [15] BĚHÁLEK, Luboš, Aleš AUSPERGER, Petr LENFELD a Josef PŮTA. Conformal Cooling of Injection Moulds. In: *21. Fachtagung Technomer 2009*. Chemnitz, 2009, s. 4. ISBN 978-3-939382-09-6.
- [16] BĚHÁLEK, Luboš. Morphology and Properties of Injection Parts by Application of High-Conductivity Material and Heat-Pipe on the Injection Mould. In: *12. mezinárodní konference Vstřikování plastů*. Praha, 2008, s. 6. ISSN 1213-2632.
- [17] BĚHÁLEK, Luboš. Heat-Pipe and High-Conductivity Materials in Cooling System of Injection Mould. In: *NTKI 2008*. Ústí n. Labem, 2008, s. 7. ISBN 978-80-7044-969-1.
- [18] BĚHÁLEK, Luboš, Jiří BOBEK a František LEDNICKÝ. Effect of the Heat Pipe and High-Conductive Materials on Cooling Intensity of Injection Mould. In: *Technológia 2007*. Bratislava, 2007, s. 6. ISBN 978-80-227-2712-9.
- [19] POUPA, Tomáš a Luboš BĚHÁLEK. Injection Mould Cooling with the Support of Compressed Air. In: *Mezinárodní Baťova doktorandská konference*. Zlín, 2007, s. 6. ISBN 978-80-7318-529-9.
- [20] BĚHÁLEK, Luboš, Aleš AUSPERGER, Petr LENFELD a Josef PŮTA. Effect of Heat-Pipe and High-Conductivity Materials on the Temperature Fields and Skin-Core morphology of plastic parts. In: *20. Fachtagung Technomer 2007*. Chemnitz, 2007, s. 9. ISBN 978-3939382-08-09.
- [21] BĚHÁLEK, Luboš, Jiří BOBEK a František LEDNICKÝ. Morphology and Properties of Polypropylene Injected Parts in Relation to Cooling Methods and Mould Material. In: *Advances in Plastics Technology 07'*. Katowice, 2007, s. 7. ISBN 978-83-917693-7-9.
- [22] POUPA, Tomáš a Luboš BĚHÁLEK. Application of Vortex Tube on One-Cavity Injection Mould. In: *18. mezinárodní konference Plasty - konstrukční materiály*. Praha, 2007, s. 5. ISSN 1213-2640.
- [23] BĚHÁLEK, Luboš, Aleš AUSPERGER a Tomáš POUPA. Thermal Load of the Injection Mould during Injection Process when Cu Alloys were Applied. In: *ITC 2006*. Zlín, 2006, s. 7. ISBN 80-7318-448-6.
- [24] AUSPERGER, Aleš a Luboš BĚHÁLEK. Numerické metody modelování vlivu materiálu formy na přenos tepla během vstřikování. In: *ITC 2006*. Zlín, 2006, s. 6. ISBN 80-7318-448-6.
- [25] BĚHÁLEK, Luboš, Petr LENFELD, Aleš AUSPERGER a Tomáš POUPA. Temperace vstřikovacích forem s ohledem na vlastnosti a morfologii výstřiků. In: *ICTKI '05*. Ústí nad Labem, 2006, s. 10. ISBN 80-7044-743-5.
- [26] BĚHÁLEK, Luboš, Tomáš POUPA, Petr LENFELD a Aleš AUSPERGER. Application of Ranque-Hilsch Vortex Tubes by Cooling of Injection Mould. In: *Advances in Plastics Technology 05'*. Katowice, 2005, s. 10. ISBN 83-917693-4-8.
- [27] BĚHÁLEK, Luboš, Tomáš POUPA, Petr LENFELD a Aleš AUSPERGER. Nonstationary Heat Interchange in the Course of Tempering Method of Injection Tool by Means of Vortex Tube. In: *19. Fachtagung Technomer 2005*. Chemnitz, 2005, s. 12. ISBN 3-00-017458-3.



- [28] BĚHÁLEK, Luboš. Teplotní analýza vstřikovacích forem a její vliv na kvalitu plastových výrobků. In: *Mezinárodní vědecké sympóziu KSP*. Liberec, 2004, s. 8. ISBN 80-7083-856-6.
- [29] BĚHÁLEK, Luboš, Petr WEINLICH, Petr LENFELD a Aleš AUSPERGER. Nekonenční metody temperování vstřikovacích forem. In: *10. mezinárodní konference Vstřikování plastů*. Praha, 2004, s. 5. ISSN 1213-2632.
- [30] BĚHÁLEK, Luboš, Petr LENFELD a Aleš AUSPERGER. Bewertung der Effektivität von Temperiersystemen in Spritzgießwerkzeug bei Gasinjektionstechnik. In: *18. Fachtagung Technomer 2003*. Chemnitz, 2003, s. 4. ISBN 3-00-01-2510-8.

V rámci odborné činnosti v oblasti zpracování plastů (*mimo uvedenou problematiku*) je disertant autorem nebo spoluautorem:

- řady odborných příspěvků v časopisech a na mezinárodních konferencích,
- sedmi udělených národních patentů a třinácti užitných vzorů z oblasti konstrukce strojních zařízení a kompozitních polymerních materiálů s přírodními vlákny, vzniklých při řešení výzkumného záměru MSM 4674788501 *"Optimalizace vlastností strojů v interakci s pracovními procesy a člověkem"* (2005-2012; hlavní řešitel: doc. Ing. František Novotný, CSc.) a projektu Technologické agentury České republiky TA01010946 *"Výzkum užitných vlastností a aplikačních možností polymerních materiálů s přírodními plnivými a nanoplivy na bázi syntetických a PLA matic"* (2011-2013; hlavní řešitel: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld),
- jednoho uděleného světového patentu v rámci řešení projektu TA01010946.

## OHLASY PUBLIKACÍ K DANÉ PROBLEMATICE

### **Kniha:**

- [1] GREŠKOVIČ, František, Emil SPIŠÁK, L'udmila DULEBOVÁ, Ján VARGA a Michal FABIAN. *Nástroje na spracovanie plastov (vstrekovacie formy)*. 1. vyd. Košice: TU v Košiciach, 2010, 220 s. ISBN 978-80-553-0350-5. (ohlas na [11] a [12] v kap. 5: *Temperovanie foriem*).

### **Článek zařazený do světově uznávané databáze:**

- [2] SOBOTOVÁ, Lýdia, Miroslav BADIDA, L'udmila DULEBOVÁ a Zdenka DŽOGANOVÁ. The Experimental Verification of the Impact of Regrind on Mechanical Properties of Thermoplastics. *Advanced Materials Research*. 2013, svazek 816-817, s. 13-17. ISSN 1022-6680. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.816-817.13. (ohlas na [6]).
- [3] RUŽBARSKÝ, Juraj a Jozef ŽARNOVSKÝ. Optimization of Parameters in the Compression Moulding Process of Thermoset Products. *Advanced Materials Research*. 2013, svazek 801, s. 61-66. ISSN 1022-6680. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.801.61. (ohlas na [13]).
- [4] AHN, Dong-Gyu. Applications of Laser Assisted Metal Rapid Tooling Process to Manufacture of Molding. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2011, vol. 12, issue 5, s. 925-938. ISSN 1229-8557. DOI: 10.1007/s12541-011-0125-5. (ohlas na [50]).





**Článek v recenzovaném časopise:**

- [5] BORKAR, Sulas G. a R. S. SHELKE. Improvement in Conventional Water Jacket Method in Mould Cooling using Heat Pipe. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2012, roč. 4, č. 4, s. 1576-1580. ISSN 0975-5462. (ohlas na [3]).
- [6] BORKAR, Sulas G. a R. S. SHELKE. Optimum Performance of Heat Pipes in Mould Cooling. *International Journal of Modern Engineering Research*. 2012, roč.. 2, č. 3, s. 1260-1262. ISSN 2249-6645. (ohlas na [5]).
- [7] DOBRÁNSKY, Jozef. Comparison of different Mold Runner Systems in Injection Molding Plastic Part Production by the Computer Simulation. *Scientific Papers Operation and Diagnostics of Machines and Production Systems Operational States*. 2009, roč. 2, s. 108-113. ISBN 978-3-9802659-8-0. (ohlas na [1]).
- [8] DOBRÁNSKY, Jozef, Emil RAGAN a Naqib DANESHJO. Determination of Technological Parameters Limit Values on Planed Experiment, Proposal for Following Products from Thermoplastics Qualitative Parameters. *Engineering Review*. 2009, roč. 29, č. 2, s. 45-51. UDC 678.7.027:620.22-036.5: 519.242. (ohlas na [1]).

**Článek ve sborníku konference:**

- [9] GREŠKOVIČ, František, L'udmila DULEBOVÁ a Branislav DULEBA. Study of Properties of Composites Based on Polyolefin and Mineral Additives. In: *Technological forum 2013*. Kouty, 2013, s. 5. ISBN 978-80-87583-06-7. (ohlas na [2]).
- [10] FRĄCZ, Wiesław. Symulacje procesów formowania wtryskowego w komercyjnych programech CAE. In: *PRO-TECH-MA 2010*. Lublin, 2010, s. 10. ISBN 978-837497-094-5. (ohlas na [9]).
- [11] FRĄCZ, Wiesław a Tomasz TRZEPIECIŃSKI. Prognozowanie deformacji powtryskowych wyprasek za pomocą sztucznych sieci neuronowych. In: *PRO-TECH-MA 2010*. Lublin, 2010, s. 10. ISBN 978-837497-094-5. (ohlas na [3]).
- [12] DOBRÁNSKY, Jozef, Imrich VOJTKO a Petr BARON. Analyze of Thermoplastic Flowing in Product for Automobile Industry by Plastic Adviser. In: *Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*. Hammamet, 2009, s. 4. ISSN 1840-4944. (ohlas na [2] a [3]).
- [13] ULÍK, Juraj. Simulácia vstrekovania plastov s použitím programu Mold Flow. In: *Technológia 2007*. Bratislava, 2007, s. 5. ISBN 978-80-227-2712-9. (ohlas na [5]).
- [14] ULÍK, Juraj. Vplyv technologických parametrov vstrekovania na priebeh tlaku vo vstrekovacej forme. In: *Technológia 2005*. Bratislava, 2005, s.5. ISBN 80-227-2264-2. (ohlas na [7]).



## LITERATURA

- [1] *Plastics - the Facts 2013 (An Analysis of European Latest Plastics Production, Demand and Waste Data)*. Brussels. PlasticsEurope - Association of Plastics Manufacturers, 2013. s. 40.
- [2] MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR. *Fyzika polymerů (struktura a vlastnosti polymerních materiálů)*. 1. vyd. Praha: SNTL/ALFA, 1987, 306 s. ISBN 04-634-87.
- [3] MANZIONE, Louis T. *Applications of Computer Aided Engineering in Injection Moulding*. München: Hanser, 1987, 318 s. ISBN-13: 978-3446147034.
- [4] THRONE, James L. *Plastic Process Engineering*. New York: Marcel Dekker, 1979, 944 s. ISBN-13: 978-0824767006.
- [5] KAMAL, Musa R., Avraam ISAYEV a Shih-Jung LIU. *Injection Molding: Fundamentals and Applications*. München: Hanser, 2009, 926 s. ISBN-13: 978-1569904343.
- [6] BALLMAN, Richard L. a T. SHUSMAN. Easy Way to Calculate Injection Molding Set-up Times. *Modern Plastics*. 1959, roč. 37, č. 3.
- [7] BUSCH, John V., Frank R. FIELD a Donald ROSATO. Computer - Aided Part Cost Analysis for Injection Molding. In: *8th Conference Proceedings, SPE ANTEC*. Boston, 2005.
- [8] YU, C.J. a J.E. SUNDERLAND. Determination of Ejection Temperature and Cooling Time in Injection Molding. *Polymer Engineering and Science*. 1992, roč. 32, č. 3, s. 191-197. ISSN 0032-3888.
- [9] KIRCH, Dieter a Georg MENGES. Cooling Time Reductions in the Injection Molding of Semi-crystalline Polymers. In: *43rd Annual Technical Conference-Conference Proceedings for the Society of Plastics Engineers, ANTEC '85*. Washington DC, 1985, s. 761-763. ISSN 07334192.
- [10] WHITE, James L. The Injection Molding Process. BERNHARDT, Ernest C. *Computer Aided Engineering for Injection Molding*. New York: Hanser, 1983, s. 105-106. ISBN: 3446139508.
- [11] LIANG, Ji Zhao. a J.N. Ness. The Calculation of Cooling Time in Injection Moulding. *Journal of Materials Processing Technology*. 1996, roč. 57, č. 1-2, s. 62-64. ISSN 0924-0136.
- [12] GABRIEL, Jiří. Tepelná analýza vstřikovacích forem (Cadmould Cool). In: *4. mezinárodní konference Plasty - konstrukční materiály*. Praha, 2005, s. 7. ISSN 1213-2640.
- [13] LENFELD, Petr. Teplotní pole ve vstřikovacích formách. *Plasty a kaučuk*. 1997, roč. 34, č. 8, s. 228-232. ISSN 0322-7340.
- [14] GRIES, Helmut. Maßgeschneidert temperieren. *Kunststoffberater*. 1999, roč. 44, č. 9, s. 31-34. ISSN 0172-6374.
- [15] ZÖLLNER, Olaf. *Optimierte Werkzeugtemperierung* (Anwendungstechnische Information KU 21 104-9901 d,e/5056841). Leverkusen: Bayer AG., 1999, 64 s.
- [16] RŮŽIČKA, Zdeněk. *Výzkum vlivu materiálu nástroje na fyzikálně-mechanické vlastnosti polymerů*. Brno, 2002. Disertační práce. VUT v Brně.
- [17] KAMAL, Musa Rasim, R. A. LAI-FOOK a Jose R. HERNANDEZ-AGUILAR. Residual Thermal Stresses in Injection Moldings of Thermoplastics: A Theoretical and Experimental Study. *Polymer Engineering and Science*. 2002, roč. 42, č. 5, s. 1098-1114. ISSN 0032-3888.



- [18] SOVA, Miloš, Josef KREBS et al. *Termoplasty v praxi*. Praha: Dashöfer, 1999-2004. ISBN 80-86229-15-7.
- [19] HALAŠKA, Petr a Miroslav MAŇAS. Optimalizace tloušťky výstřiku pomocí Moldflow<sup>TM</sup>. In: *4. Mezinárodní konference Plasty - konstrukční materiály*. Praha, 2005, s. 9. ISSN 1213-2640.
- [20] BĚHÁLEK, Luboš. Speciální temperační prostředky. SOVA, Miloš et al. *Termoplasty v praxi*. Praha: Dashöfer, 1999-2004, 11 s. ISBN 80-86229-15-7.
- [21] Kühlkanäle folgen der Formteilkontur (Intensivere Kühlung in Spritzgießwerkzeugen). *Kunststoffe*. 1997, svazek 87, č. 1, s. 36-37. ISSN 0023-5563.
- [22] WOLANSKY, C. Höhere Produktivität und mehr Qualität ("Tool-Vac" - Technologie in Spritzgießwerkzeugen). *Kunststoffberater*. 1998, svazek 9, s. 38-46. ISSN 0172-6374.
- [23] JUNGMEIER, Ariane, Gottfried W. EHRENSTEIN a Dietmar DRUMMER. New Aspects of Process Induced Properties of Microinjection Moulded Parts. *Plastics, Rubber and Composites*. 2010, roč. 39, č. 7, s. 308-314. ISSN 14658011.
- [24] MEISTER, Steve, Ariane JUNGMEIER a Dietmar DRUMMER. Long -Term Properties of Injection-Molded Micro-Parts: Influence of Part Dimensions and Cooling Conditions on Aging Behavior. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2012, roč. 297, č. 10, s. 994-1004. ISSN 14387492.
- [25] KELLY, Adrian L., Leigh MULVANEY-JOHNSON, Rex BEECHEY a Philip D. COATES: The Effect of Copper Alloy Mold Tooling on the Performance of the Injection Molding Process. *Polymer Engineering and Science*. 2011, roč. 51, č. 9, s. 1837-1847. ISSN 00323888.
- [26] BARETA, Deives Roberto, Antônio Sérgio POUZADA a Carlos Alberto COSTA. The Effect of Rapid Tooling Materials on Mechanical Properties of Tubular Mouldings. In: *2<sup>nd</sup> International Conf. on Polymers & Moulds Innovations*. Ghent, 2007, s. 6.
- [27] LAPČÍK, Lubomír a Miroslav RAAB. *Nauka o materiálech II*. Zlín: UTB ve Zlíně, 2001, 115 s. ISBN 80-238-6527-7.
- [28] HAMAN Soromo. *Prozessnahes Qualitätsmanagement beim Spritzgießen*. Chemnitz, 2004. Disertační práce. TU Chemnitz.
- [29] GUTOWSKI, Tim. *Injection Molding*. Chicago, 2006. Prezentace. University of Chicago.
- [30] BĚHÁLEK, Luboš. Reologie tavenin termoplastů. LENFELD, Petr et al. *Strojírenská technologie (vybrané prezentace)*. Liberec: TU v Liberci, 2008. s. 14. ISBN 978-80-7372-326-2.
- [31] RAAB, Miroslav. *Materiály a člověk: (netradiční úvod do současné materiálové vědy)*. 1. vyd. Praha: Encyklopedický dům, 1999, 228 s. ISBN 80-860-4413-0.
- [32] KREBS, Josef. *Hodnocení reologických vlastností tavenin termoplastů*. Liberec, 1970. Habilitační práce. VŠST v Liberci.
- [33] ABBOTT, Richard, Richard COMBS, David KAZMER et al. Elimination of Process Constraints in Plastics Injection Molding. In: *Molding 2003 Executive Technology Conference*. New Orleans, 2003.
- [34] HALAŠKA, Petr. *6. Moldflow Workshop Smartplast*. Zlín, 2008. CD Prezentace. Smartplast s.r.o.
- [35] ŠAFARÍK, Miloslav. *Nástroje pro tváření kovů a plastů (cvičení)*. 1. vyd. Liberec: VŠST v Liberci, 1991, 181 s. ISBN 80-7083-014-X.
- [36] LENFELD, Petr. *Teplotní pole ve vstříkovacích formách*. Liberec, 1997. Disertační práce. TU v Liberci.



- [37] SAZIMA, Miroslav, Vladimír KMONÍČEK, Jiří SCHNELLER et al. *Teplo*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1989, 588 s. ISBN 80-03-00043-2.
- [38] ČATIĆ, Igor J. Cavity Temperature - an Important Parameter in the Injection Molding Process. *Polymer Engineering and Science*. 1979, roč. 19, č. 13, s. 893-899. ISSN 00323888.
- [39] BOBČÍK, Ladislav et al. *Formy pro zpracování plastů II. díl - Vstřikování termoplastů*. Brno: UNIPLAST Brno, 1999, 214 s.
- [40] MAŇAS, Miroslav a Paul GORBACH. Temperace forem. *Plasty a kaučuk*. 1991, roč. 28, č. 8, s. 232-236. ISSN 0322-7340.
- [41] KLEČKOVÁ, Marie. *Nestacionární teplotní pole a napjatost ve strojních součástech*. 1. vyd. Praha: SNTL Praha, 1979, 280 s. ISBN 04-230-79.
- [42] NOVÁ, Iva. *Tepelné procesy ve slévárenských formách*. 1. vyd. Liberec: TU v Liberci, 2002, 133 s. ISBN 80-7083-662-8.
- [43] NOVÁ, Iva, Petr KOSEK a Jan ŠMRHA. Slévárenské simulační programy. *MM Průmyslové spektrum*. 2005, č. 11, s. 80-82. ISSN 1212-2572.
- [44] KUNEŠ, Josef. *Modelování tepelných procesů*. 1. vyd. Praha: SNTL Praha, 1989, 423 s. ISBN 80-03-00134-X.
- [45] LENFELD, Petr, Aleš AUSPERGER, Luboš BĚHÁLEK a Josef PŮTA. Monitoring and Efficiency Evaluation of GWK Cooling System. In: *20. Fachtagung Technomer 2007*. Chemnitz, 2007, s. 5. ISBN 978-3-939382-08-9.
- [46] KREBS, Josef a Petr LENFELD. Temperování forem pro vstřikování termoplastů. *Plasty a kaučuk*. 1994, roč. 31, č. 8, s. 235-238. ISSN 0322-7340.
- [47] ŘEHULKA, Zdeněk. Konstrukční zásady při temperaci forem. In: *Formy, stroje, plasty*. Brno, 2001, s. 13.
- [48] KRUIJSEN, Theo. Regelungstechnik. *Handbuch der Temperierung mittels flüssiger Medien*. 5. vyd. St. Gallen: Hüthig - Regloplas, 1997, s. 42-52. ISBN 3-7785-2623-5.
- [49] PILSL, J. Wasser als Wärmeträger. *Handbuch der Temperierung mittels flüssiger Medien*. 5. vyd. St. Gallen: Hüthig - Regloplas, 1997, s. 74-77. ISBN 3-7785-2623-5.
- [50] WEITKAMP, W. Behandlung von Wasser für Wärmeübertragungsanlagen. *Handbuch der Temperierung mittels flüssiger Medien*. 5. vyd. St. Gallen: Hüthig - Regloplas, 1997, s. 78-80. ISBN 3-7785-2623-5.
- [51] GOHLKE, R. Wärmeträgeröle. *Handbuch der Temperierung mittels flüssiger Medien*. 5. vyd. St. Gallen: Hüthig - Regloplas, 1997, s. 81-84. ISBN 3-7785-2623-5.
- [52] Pulzní chlazení vstřikovacích forem. *Plasty a kaučuk*. 2000, roč. 37, č. 6, s. 189.
- [53] STOECKERT, Klaus a Gunter MENNIG. *Mold - Making Handbook for the Plastics Engineer*. 2. Ed. München: Hanser, 1998. 480 s. ISBN 9781569902615.
- [54] WESTHOFF, Ralf. Verbesserung der Qualität und Verkürzung der Zykluszeit durch optimierte Temperierung von Spritzgiessformen mit gefügten Temperierkanalsystemen. *Handbuch der Temperierung mittels flüssiger Medien*. 5. vyd. St. Gallen: Hüthig - Regloplas, 1997, s. 96-99. ISBN 3-7785-2623-5.
- [55] Výkresová dokumentace projektu fy. Valeo Autoklimatizace s.r.o. Rakovník
- [56] VÖGTLE, Michael. *Die LaserCUSING - Technologie im Werkzeug- und Formenbau*. Flawil, 2007. Prezentace. Büchler Werkzeugbau AG.
- [57] Alternative Cooling Devices. DSM Engineering Plastics. [online]. [cit. 2013-09-22]. Dostupné z: [http://www.dsm.com/en\\_US/html/dep/alternativecoolingdevices.htm](http://www.dsm.com/en_US/html/dep/alternativecoolingdevices.htm)
- [58] *Applied for Cooling of the Injection Mold Using "Heat Pipe" as Superior Heat Conductive*. Tokyo, 1985. Fujikura Ltd.



- [59] BOBEK, Jiří. *Aplikace tepelné trubice ve fázi chlazení procesu vstřikování polypropylenu*. Liberec, 2007. Diplomová práce. TU v Liberci.
- [60] POLÁŠEK, František a Petr ŠTULC. Intenzifikace chlazení forem na zpracování plastů tepelnými trubicemi. In: *Formy pro zpracování plastů*. Brno, 1994.
- [61] HLAVAČKA, Vojtěch, František POLÁŠEK, Petr ŠTULC a V. ZBOŘIL. *Tepelné trubice v elektrotechnice*. 1. vyd. Praha: SNTL Praha, 1990. 150 s.
- [62] SWENSON, P. a H. LADWIG. Wärmeleitrohre in Heißkanalsystemen. *Kunststoffe*. 1992, svazek 82, č. 12, s. 1157-1160. ISSN 0023-5563.
- [63] POUPA, Tomáš. *Teplotní analýza vstřikovací formy při nekonvenčním způsobu temperování Ranque-Hilsch vírovou trubicí*. Liberec, 2005. Diplomová práce. TU v Liberci.
- [64] *Vortex Tubes and Spot Cooling Products*. Cincinnati. Firemní podklady. EXAIR Corporation.
- [65] BERGHOFF, M. *Perspektiven bei Temperierung von Problemzonen im Werkzeug*. Iserlohn. Odborná zpráva. Iserlohner Kunststoff-Technologie GmbH.
- [66] FRÖHLINGSDORF, W. a H. UNGER. Numerical Investigations of the Compressible Flow and the Energy Separation in the Ranque-Hilsch Vortex Tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1999, roč. 42, č. 3, s. 415-422. ISSN 0017-9310.
- [67] KUROSAKA, M. Acoustic Streaming in Swirling Flow and the Ranque-Hilsch Effect. *Journal of Fluid Mechanics*. 1982, svazek 124, s. 139-172. ISSN 1750-6859.
- [68] WÜBKEN, Gottfried. Methods of Calculating and Assessing Injection Mould Temperature Control Systems. *Injection moulds*. Düsseldorf: VDI, 1980, s. 25. ISBN 3-18-404060-7.
- [69] *Studie teplotního pole formy blatníku vozu Renault*. Praha. Odborná zpráva. Ancora Praha s.r.o.
- [70] ALMÁSY, Karel. Slitiny na bázi mědi AMPCO a AMPCOLOY v průmyslu plastů. In *Formy Brno 05*. Brno, 1994, s. 5.
- [71] MECOBOND - Der Quantensprung in der Kühlung und Temperierung von Dauerformen für Kunststoffspritzguß und Metall-Druckguß. MECOBOND Dr.Betz GmbH. [online]. [cit. 2013-09-22]. Dostupné z: <http://mecobond.de>
- [72] PELTZBAUER, Zdeněk. Mikroskopie a morfologie makromolekulárních látek. *Malé makromolekulární monografie*. Praha: ČSAV Praha, ÚMCH, 1971, s. 49-76.
- [73] LEDNICKÝ, František. *Mikroskopie a morfologie polymerů (Díl 2. Morfologie polymerů)*. 1. vyd. Liberec: TU v Liberci, 2009, 97 s. ISBN 978-80-7372-487-0.
- [74] WOODWARD, Arthur, E. *Atlas of Polymer Morphology*. München: Hanser, 1989, 531 s. ISBN 3-446-15175-3.
- [75] STOKLASA, Karel. *Makromolekulární chemie I*. Zlín: UTB ve Zlíně, 2005, 106 s.
- [76] VAN DER VEGT, A.K. *From Polymers to Plastics*. Delft: Vereniging voor Studie en Studentenbelangen te Delft, 2002, 240 s.
- [77] MILITKÝ, Jiří a Jiří VANÍČEK. *Vlastnosti vláken (molekulová a nadmolekulová struktura polymerů, strukturní modely)*. Liberec. Výukový text. TU v Liberci.
- [78] HEMSLEY, Derek A. et al. *Applied polymer Light Microscopy*. London: Elsevier, 1989, 282 s. ISBN 1-85166-335-5.
- [79] RYBNÍKÁŘ, František. Heterogenní nukleace. *Plasty a kaučuk*. 1988, roč. 25, č. 2, s. 42-45. ISSN 0322-7340.
- [80] MACHÁČEK, Leopold. *Struktura a vlastnosti polymerů I*. Brno: VUT v Brně, 1976, 165 s. ISBN 55-584-76.

- [81] RYBNÍKÁŘ, František, Zdeněk DITRYCH, Zdeněk KLÁCEL a Oldřich ORDELT. *Analýza a zkoušení plastických hmot*. 1. vyd. Praha: SNTL Praha, 1965, 418 s.
- [82] NAN-YING, Ning, Yin QIN-JIAN, Luo FENG, Zhang QIN, Du RONGNI a Fu QIANG. Crystallization Behavior and Mechanical Properties of Polypropylene/Halloysite Composites. *Polymer*. 2007, roč. 48, s. 7374-7384. ISSN 0032-3861.
- [83] PELTZBAUER, Zdeněk. Morfologie a mikroskopie polymerů. *Základy fyziky polymerů (edice macro M-16)*. Praha: ČSAV Praha, ÚMCH, 1987, s. 51-90.
- [84] FERRAGE, Eric, Francois MARTIN, Alain Michel BOUDET, et al. Talc as Nucleating Agent of Polypropylene: Morphology Induced by Lamellar Particles Addition and Interface Mineral-Matrix Modelization. *Journal of Materials Science*. 2002, roč. 37, s. 1561-1573. ISSN 0022-2461.
- [85] KELLER, Thomas. *Polymereinkristalle: Züchtung und Charakterisierung*. Jena výukový materiál. Jena, 2006. Výukový text. Friedrich-Schiller-Universität Jena.
- [86] GROßKURTH, Klaus Peter. *Crystallisation of Polypropylene*. Göttingen, 2002. Video. IWF Wissen und Medien GmbH.
- [87] KRISOVÁ, Alena. Struktura povrchových vrstev a jádra polypropylenových výstřiků. *Plasty a kaučuk*. 1977, roč. 14, č. 6, s. 169-172. ISSN 0322-7340.
- [88] KENNEDY, P. *Major Research Initiatives – Moldflow*. Prezentace.
- [89] CHOI, Nak Sam, a Kiyoshi TAKAHASHI. Orientation of the Skin Layer in Molded Blends of Thermotropic Liquid Crystalline Polymer and Polyamide 6. *Journal of Materials Science Letters*. 2000, roč. 19, č. 16, s. 1435-1438. ISSN 0261-8028.
- [90] KRISOVÁ, Alena et al. *Výzkum strukturního stavu a nehomogenity výstřiků z termoplastů*. Praha, 1975. Výzkumný úkol SCV 1071. SVÚM Praha.
- [91] FUJIYAMA, M. Higher Order Structure of Injection-Molded Polypropylene. KARGER-KOCSIS, J. *Polypropylene: Structure, Blends and Composites*. London: Chapman & Hall, 1995, 392 s. ISBN 0-412-58430-1.
- [92] ČERMÁK, Roman; Martin OBADAL, Petr PONÍŽIL, Martina POLÁŠKOVÁ, Karel STOKLASA a Anežka LENGÁLOVÁ. Injection-Moulded  $\alpha$ - and  $\beta$ -Polypropylenes: I. Structure vs. Processing Parameters. *European Polymer Journal*. 2005, roč. 41, č. 8, s. 1838-1845. ISSN 0014-3057.
- [93] NEUHÄUSL, Emil. Studium významnosti technologických parametrů v procesu vstřikování termoplastů. *Plasty a kaučuk*. 1984, roč. 21, č. 3, s. 68-73. ISSN 0322-7340.
- [94] KRISOVÁ, Alena a Emil NEUHÄUSL. Vliv vstřikovacího procesu na nadmolekulární strukturu výstřiků z Československých polyolefinů. *Plasty a kaučuk*. 1985, roč. 22, č. 2, s. 36-42. ISSN 0322-7340.
- [95] CUNHA, António M., J. S. GODINHO, a J. C. VIANA. Processing-Structure-Properties Relationships in Injection Moulding. CUNHA, António M. a Stoyko FAKIROV. *Structure Development in Polymer Processing*. Nato Sciences Series E, vol. 370, Kluwer AP (2000).
- [96] PONTES, António J., M.J. OLIVEIRA a Antonio Sergio POUZADA. Studies on the Influence of the Holding Pressure on the Orientation and Shrinkage of Injection Molded Parts. In *SPE ANTEC Conferences*, 2002, s. 6.
- [97] FUJIYAMA, M a KEIICHI. Skin-Core Morphology and Structure Property Relationships in Injection Molded Polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science*. 1972, roč. 16, č. 5, s. 1249-1260. ISSN 0021-8995.
- [98] HALAŠKA, Petr. Injection Process Inhomogeneities Investigations. In *International Moldflow User Group Conference 2007*. Paris, 2007, s. 60.

- [99] TROTIGNON, Jean-Pierre a Jacques VERDU. Effect of Holding Pressure on the Skin-Core Morphology of Injection-Molded Polypropylene Parts. *Journal of Applied Polymer Science*. 1990, roč. 39, s. 1215-1217. ISSN 0021-8995.
- [100] VIANA, Júlio C. Structural Interpretation of the Strain-Rate, Temperature and Morphology Dependence of the Yield Stress of Injection Molded Semicrystalline Polymers. *Polymer*. 2005, roč. 46, s. 11773-11785. ISSN 0032-3861.
- [101] LI, J.X. a Wai Lam CHEUNG. Effect of Mould Temperature on the Formation of  $\alpha/\beta$  Polypropylene Blends in Injection Moulding. *Journal of Materials Processing Technology*. 1997, roč. 63, č. 1-3, s. 472-475. ISSN 0924-0136.
- [102] SOVA, Miloš a Helena HEJDOVÁ. Anizotropie stupně krystalinity u výstřiků z polypropylénu a jeho kompozitů s krátkými skleněnými vlákny. *Plasty a kaučuk*. 1985, roč. 22, č. 4, s. 103-106. ISSN 0322-7340.
- [103] KANTZ, Melvin R., NEWMAN, JR a F.H. STIGALE. The Skin-Core Morphology and Structure-Property Relationships in Injection-Molded Polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science*. 1972, roč. 16, s. 1249-1260. ISSN 0021-8995.
- [104] BLACKADDER, David A., John S. KENIRY. The Morphological Consequences of Annealing High-Density Polyethylene in Solvents. *Journal of Applied Polymer Science*. 1972, roč. 16, s. 1261-1280. ISSN 0021-8995.
- [105] ZHANG, Xiuqin; Ying ZHAO et al. Morphology and Mechanical Behavior of Isotactic Polypropylene (iPP)/Syndiotactic Polypropylene (sPP) Blends and Fibers. *Polymer*. 2005, roč. 46, p. 5956-5965. ISSN 0032-3861.
- [106] VESELÝ, Karel. *Polymery: struktura, syntézy, vlastnosti, zpracování*. Brno: ČSPCH pobočka Uniplast Brno, 1992, 177 s. ISBN 80-02-00951-7.
- [107] MENG, Ming Rui; Qiang DOU. Effect of Pimelic Acid on the Crystallization, Morphology and Mechanical Properties of Polypropylene/Wollastonite Composites. *Materials Science and Engineering A*. 2008, svazek 492, č. 1-2, s. 177-184. ISSN 0921-5093.
- [108] HŘIBOVÁ, Martina. Využití rentgenové difrakce při výzkumu polymerních materiálů. *Plasty a kaučuk*. 2007, roč. 44, č. 3-4, s. 72-78. ISSN 0322-7340.
- [109] BALDRIÁN, Josef. Širokoúhlý rozptyl záření X. *Základy fyziky polymerů (edice macro M-16)*. Praha: ČSAV Praha, ÚMCH, 1987, s. 91-109.
- [110] VIANA, J.C, J.F. MANO, Z.Z. DENCHEV a M.J. OLIVEIRA. Structural Damage During Polymer Deformation.
- [111] MAIER, Günther. *Strukturuntersuchungen an polymeren Materialien und Knochen mit Hilfe der Röntgenkleinwinkelstreuung*. Leoben, 2005. Doktorská práce. Montanuniversität Leoben.
- [112] KOTEK, Jiří. *Fyzika polymerů*. Praha, 2006. Přednášky doktorského studia. AV ČR Praha, ÚMCH.
- [113] SOMANI, Rajesh H., Ling YANG, Lei ZHU a Benjamin S. HSIAO. Flow-Induced Shish-Kebab Precursor Structures in Entangled Polymer Melts. *Polymer*. 2005, roč. 46, s. 8587-8623. ISSN 0032-3861.
- [114] PLEŠTIL, Josef. Maloúhlový rozptyl záření X a jeho použití při studiu pevných polymerních systémů. *Plasty a kaučuk*. 1979, roč. 16, č. 12, s. 360-363. ISSN 0322-7340.
- [115] LEDNICKÝ, František. Možnosti zviditelnění nadmolekulárních struktur polymerů mikroskopickými metodami. *Plasty a kaučuk*. 1978, roč. 15, č. 9, s. 273-279. ISSN 0322-7340.



- [116] LEDNICKÝ, František. *Mikroskopie a morfologie polymerů (Díl 1. Mikroskopie polymerů a preparační techniky)*. 1. vyd. Liberec: TU v Liberci, 2009, 71 s. ISBN 978-80-7372-486-3.
- [117] MICHAELI, Walter Dirk GUTBERLET, Markus GLIEßMANN. Characterisation of the Spherulite Structure of Polypropylene using Light-Microscope Methods. *Polymer Testing*. 2001, roč. 20, č. 4, s. 459-467. ISSN 0142-9418.
- [118] MÖGINGER, Bernhard. *Morphologie von Kunststoffen und Schädigungsstrukturen : Versuch C für Polymere und Verbunde*. Sankt Augustin. Výukový text. Fachhochschule Bonn-Rhein-Sieg.
- [119] COSTA, Luigi, Karin W. JACOBSON, Valentina BRUNELLA a Pierangiola BRACCO. Effects of Microtomy on the Material Properties of Ultra High Molecular Weight Polyethylene. *Polymer Testing*. 2001, roč. 20, č. 6, s. 649-659. ISSN 0142-9418.
- [120] FRICK, Achim a Claudia STERN. *DSC-Prüfung in der Anwendung*. 1. vyd. München: Hanser, 2006, 154 s. ISBN 978-3-446-40563-9.
- [121] VANÍČEK, Jiří. *Metody termické analýzy*. Liberec. Výukový text. TU v Liberci.
- [122] RICHARDSON, Michael J. Thermal Analysis of Polymers using Quantitative Differential Scanning Calorimetry. *Polymer Testing*. 1984, roč 4, č. 2-4, s. 101-105. ISSN 0142-9418
- [123] BIROŠ, Ján a Julius POUCHLÝ. Termodynamická měření. *Malé makromolekulární monografie*. Praha: ČSAV Praha, ÚMCH, 1971, s. 121-167.
- [124] KLJUSURIĆ, Jasenka Gajdoš. Changes in Polymer Foils used in Food Packaging Tested by using Differential Scanning Calorimetry. *Sadhana – Academy Proceedings in Engineering Sciences*. 2003, roč. 28, č. 6, s. 991-998. ISSN 0256-2499.
- [125] ČSN 41 4220:1976. *Ocel 14 220 Mn-Cr*.
- [126] Materiálový list ocele EOS SS 17-4. Krailling/München. EOS GmbH.
- [127] ŘÍČAN, Daniel. *Návrh výroby tělesa plynového analyzátoru s využitím metody direct metal laser sintering*. Brno, 2011. Diplomová práce. VUT v Brně.
- [128] Materiálový list slitiny Ampcoloy 940. Marly, 2006. AMPCO METAL S.A.
- [129] Materiálový list slitiny Moldmax HH. Praha, 2006. Böhler Uddeholm CZ s.r.o.
- [130] Materiálový list polypropylenu Mosten MT 230. Litvínov. Unipetrol a.s.
- [131] ČSN EN ISO 1873-2:2008. *Plasty - Polypropylen (PP) pro tváření - část 2: Příprava zkušebních těles a stanovení vlastností*.
- [132] Manuál datové sběrnice OMB-DAQ-56
- [133] LINHART, Hynek. *Kapilární tepelné trubice - vliv okrajových podmínek*. Liberec, 2000. Diplomová práce. TU v Liberci.
- [134] ČSN EN ISO 11357-1:2010. *Plasty - Diferenční snímací kalorimetrie (DSC): Část 1: Základní principy*.
- [135] ČSN EN ISO 527-1:2012. *Plasty - Stanovení tahových vlastností: Část 1: Obecné principy*.
- [136] ČSN EN ISO 527-2:2012. *Plasty - Stanovení tahových vlastností: Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*.
- [137] ČSN EN ISO 178:2011. *Plasty - Stanovení ohybových vlastností*
- [138] ČSN EN ISO 291:2009. *Plasty - Standardní prostředí pro kondicionování a zkoušení*
- [139] *Handbuch der Temperierung mittels flüssiger Medien*. 4. vyd. St. Galen: Regloplas, 1992, 261 s.





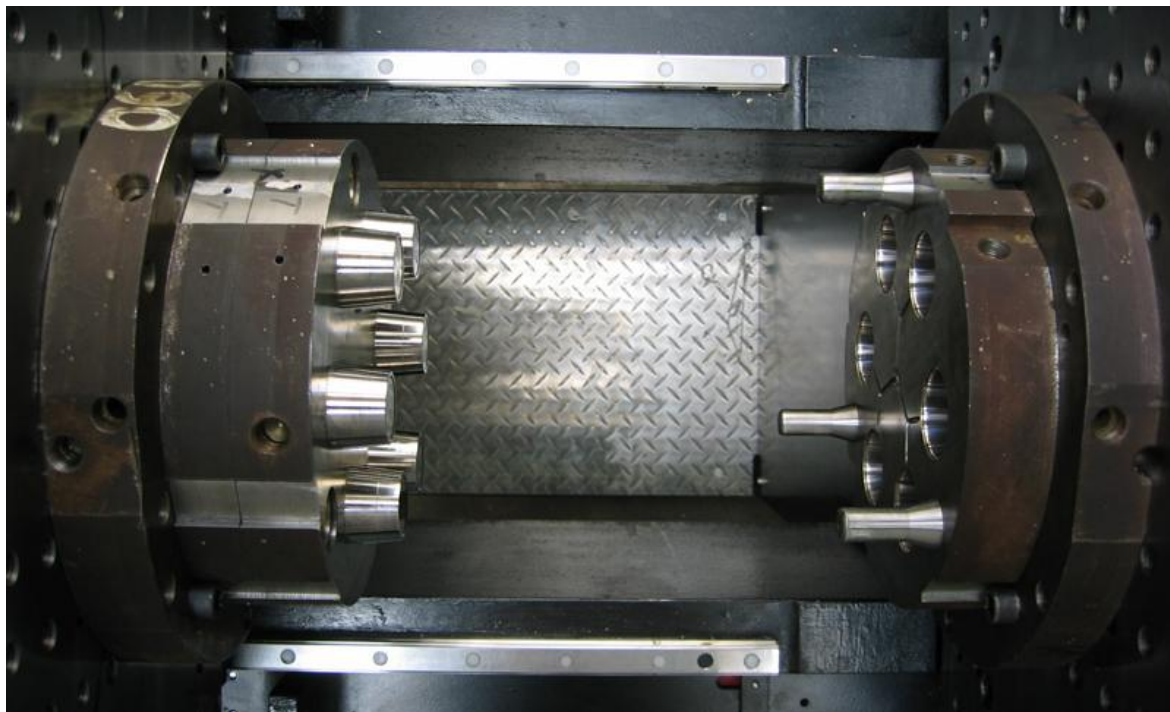
## PŘÍLOHY DISERTAČNÍ PRÁCE

### Seznam příloh:

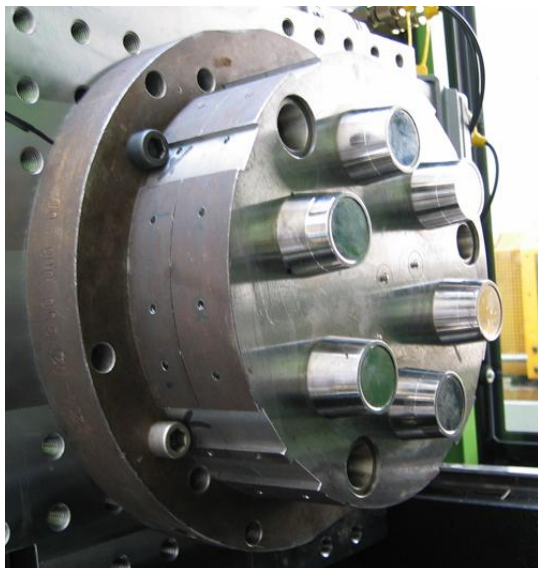
- Příloha 1 Vstřikovací forma - fotodokumentace
- Příloha 2 Konstrukce tvarové vložky vstřikovací formy
- Příloha 3 Model Ranque-Hilsch vírové trubice 208-25-H
- Příloha 4 Konstrukce konformního systému chlazení tvarové vložky
- Příloha 5 Záznamy a vyhodnocení DSC termogramů
- Příloha 6 Záznamy a vyhodnocení difraktogramů (WAXS)
- Příloha 7 Záznamy a vyhodnocení mechanických vlastností výstřiků
- Příloha 8 Výpočet součinitele prostupu tepla mezi formou a teplotonosným médiem



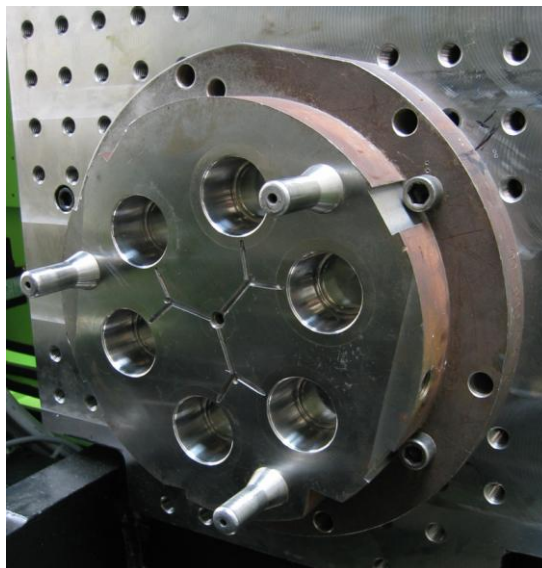
## Příloha 1: Vstřikovací forma - fotodokumentace



**Obr. P1.1** Vstřikovací forma upevněná na rámu stroje

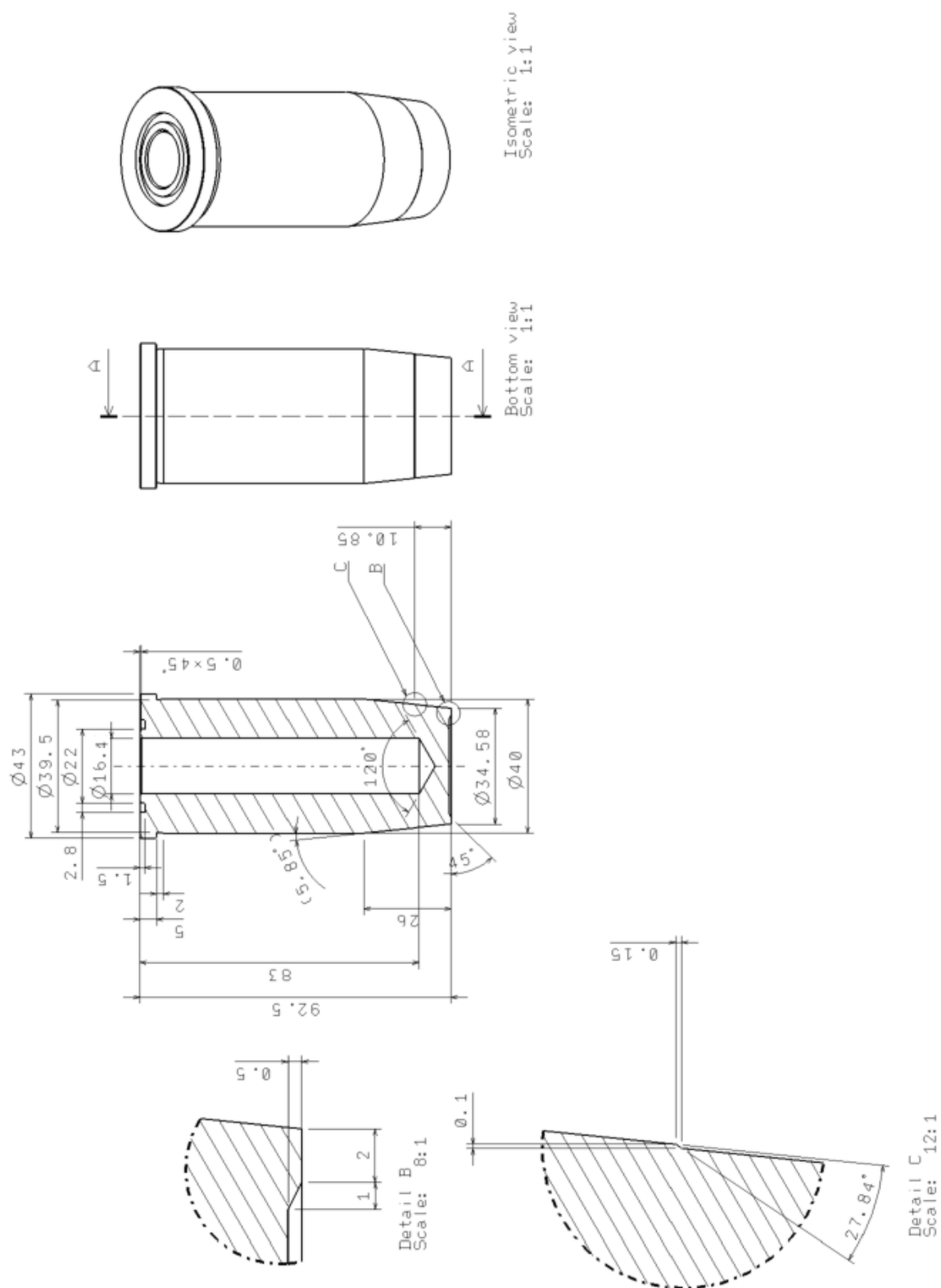


**Obr. P1.2** Pohyblivá část vstřikovací formy

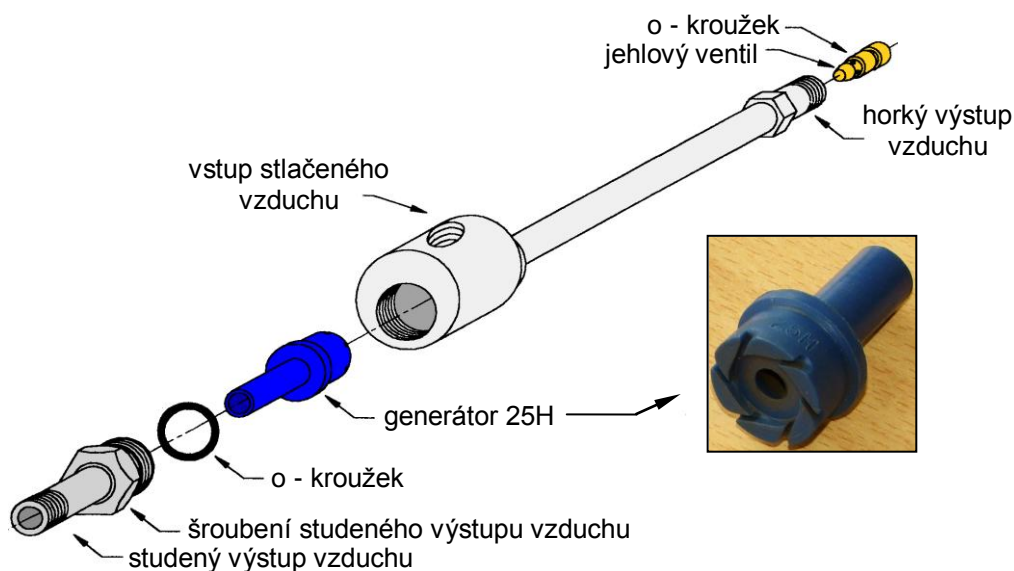


**Obr. P1.3** Pevná část vstřikovací formy

## Příloha 2: Konstrukce tvarové vložky vstřikovací formy



## Příloha 3: Model Ranque-Hilsch vírové trubice 208-25-H



**Obr. P3.1** Schéma modelu Ranque-Hilsch vírové trubice 208-25-H



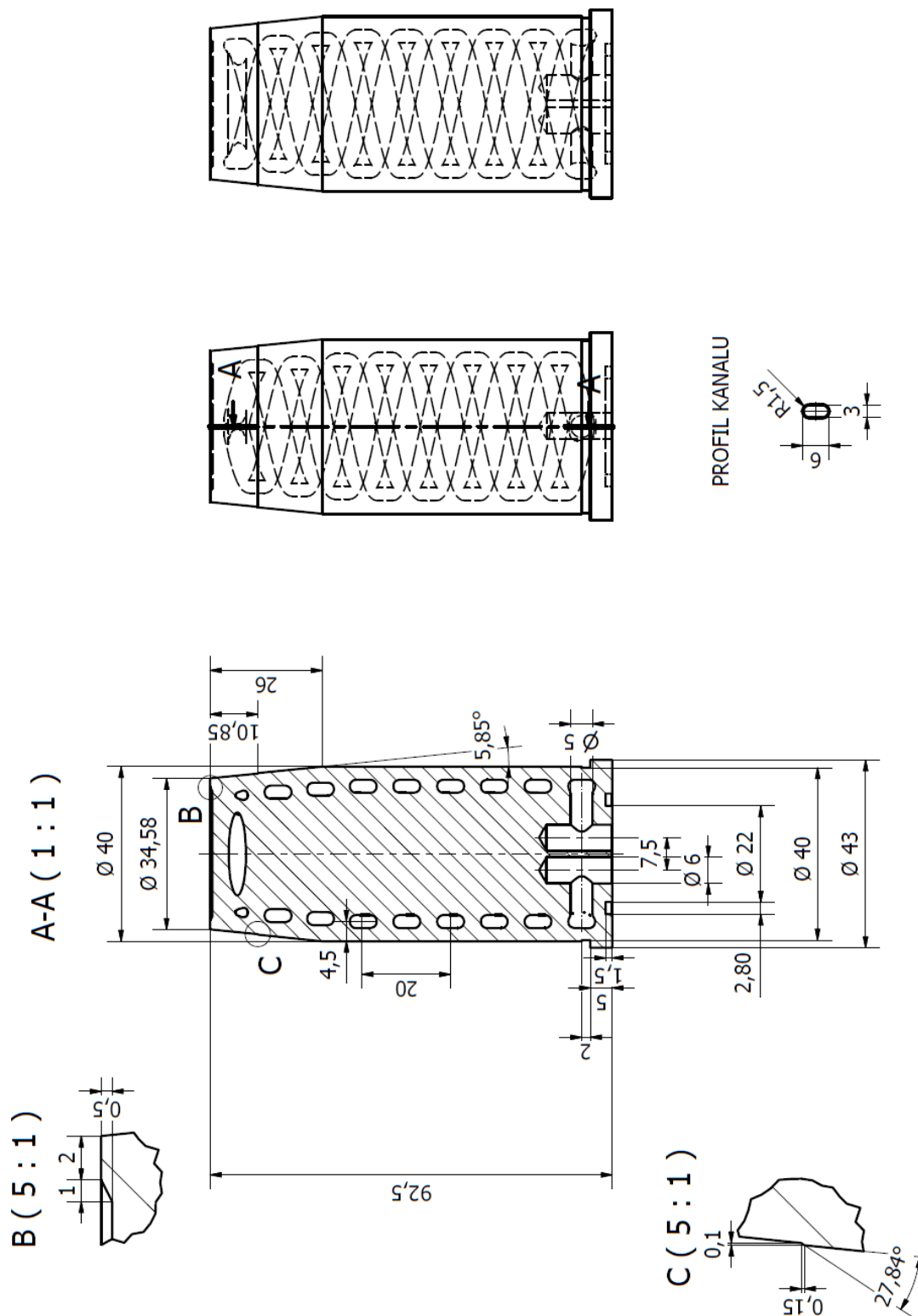
**Obr. P3.2** Model Ranque-Hilsch vírové trubice 208-25-H [64]

**Tab. P3.1** Charakteristické hodnoty vírové trubice 208-25-H [64]

Spotřeba vzduchu při 0,69 MPa [l·min <sup>-1</sup> ]	Pokles teploty [°C]	Množství tepla [W]	Spotřeba vzduchu při 0,55 MPa [l·min <sup>-1</sup> ]	Pokles teploty [°C]	Množství tepla [W]
708	37	440	585	37	331

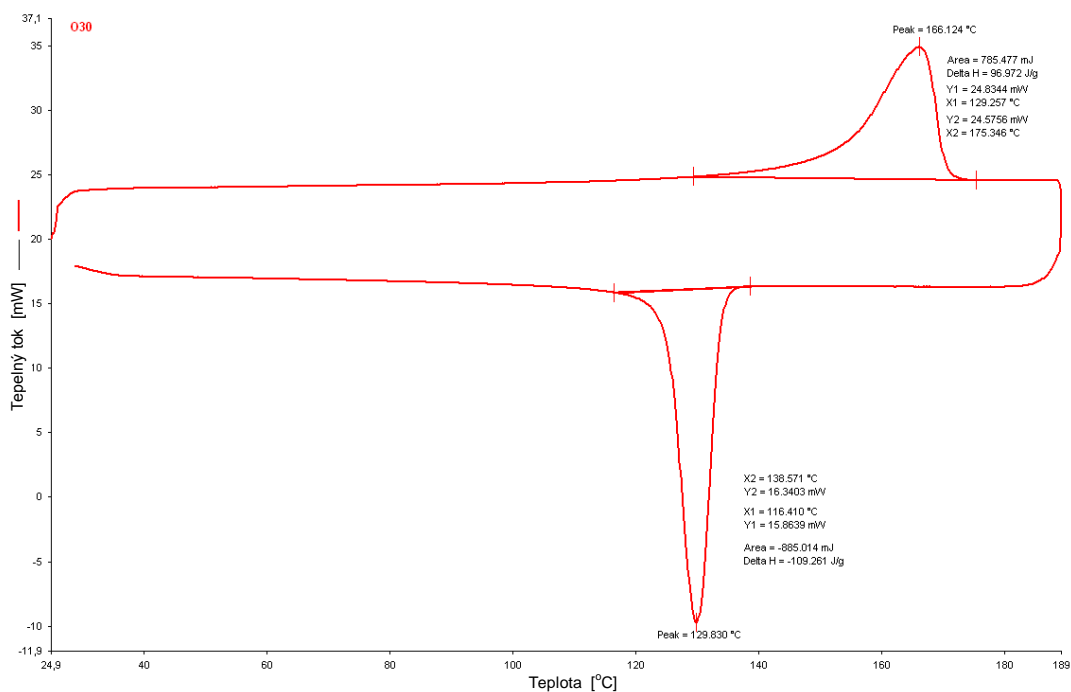
Poznámka: Množství tepla je udáno při teplotě stlačeného vzduchu 21 °C a rosném bodu -40 °C.

## Příloha 4: Konstrukce konformního systému chlazení tvarové vložky

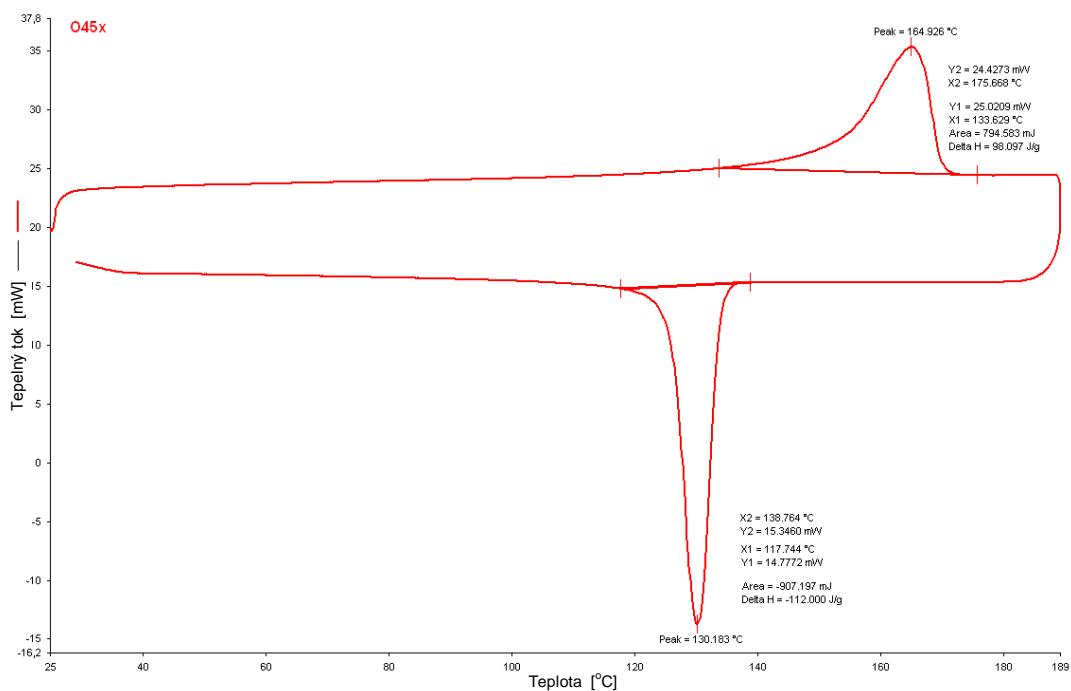




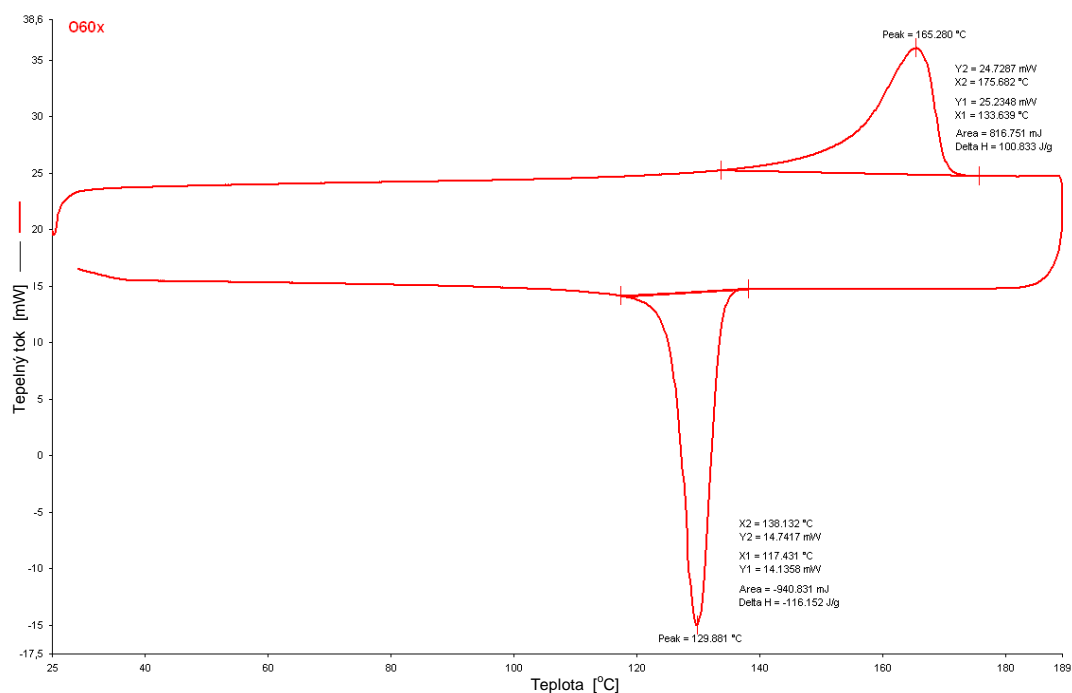
## Příloha 5: Záznamy a vyhodnocení DSC termogramů



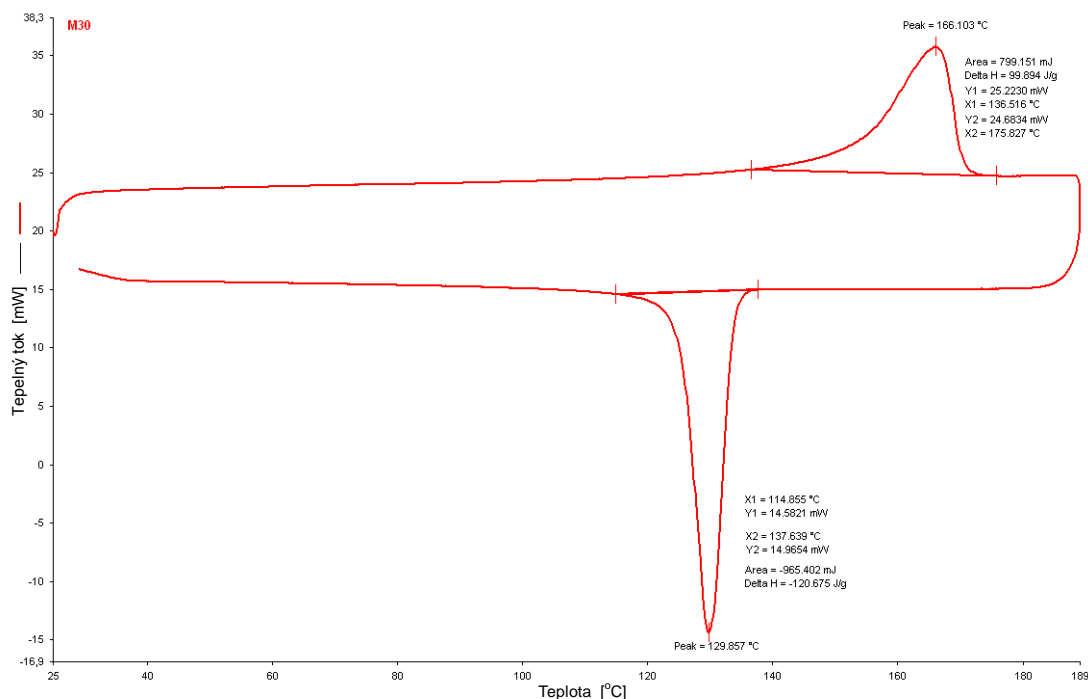
**Obr. P5.1** DSC termogram pro PP výstřik Mosten MT230 ( $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ), standardní teplotace ocelové tvarové vložky s cirkulující vodou,  $T_{tm}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$



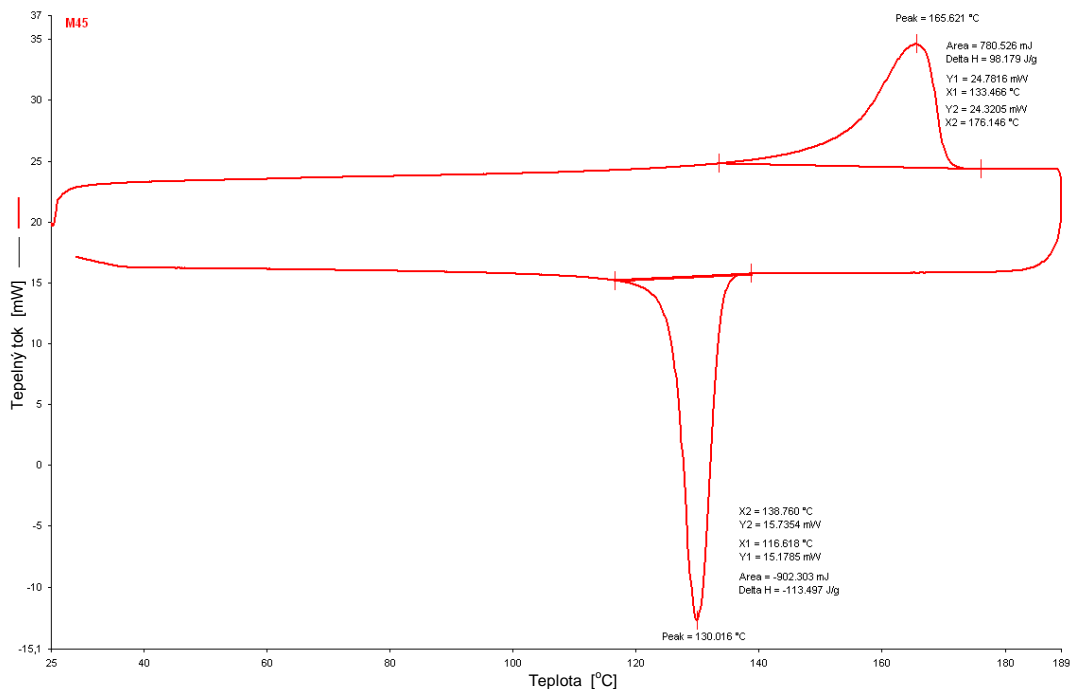
**Obr. P5.2** DSC termogram pro PP výstřik Mosten MT230 ( $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ), standardní teplotace ocelové tvarové vložky s cirkulující vodou,  $T_{tm}=45\text{ }^{\circ}\text{C}$



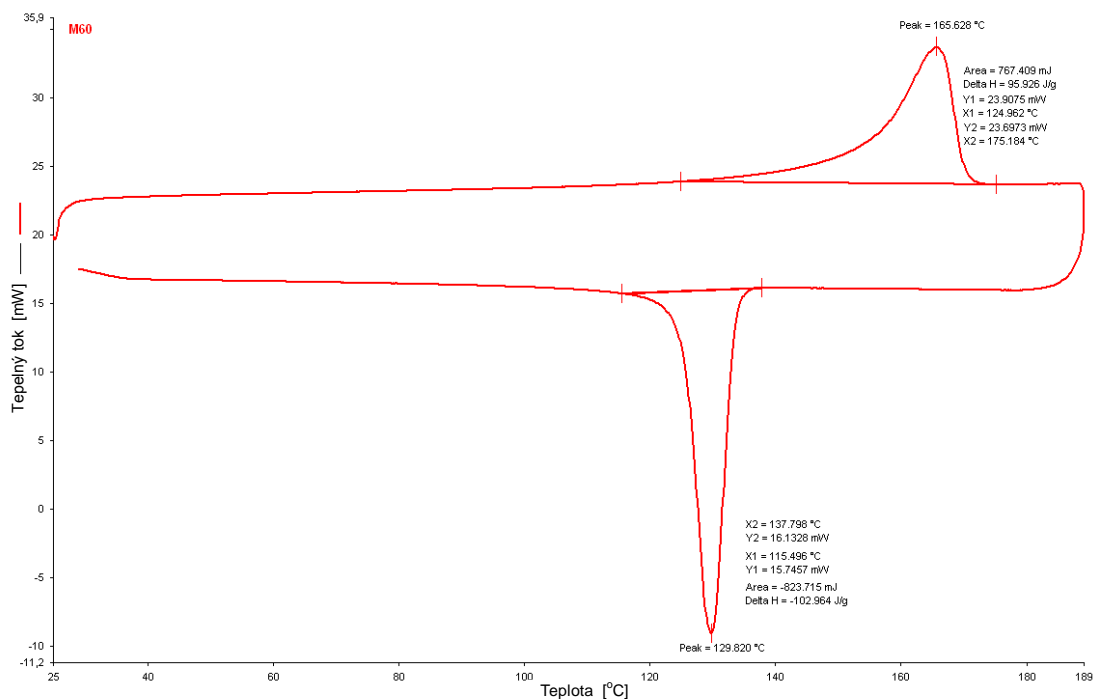
**Obr. P5.3** DSC termogram pro PP výstřik Mosten MT230 ( $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ),  
standardní teploty ocelové tvarové vložky s cirkulující vodou,  $T_{tm}=60^{\circ}\text{C}$



**Obr. P5.4** DSC termogram pro PP výstřik Mosten MT230 ( $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ),  
standardní teploty tvarové vložky Moldmax HH cirkulující vodou,  $T_{tm}=30^{\circ}\text{C}$

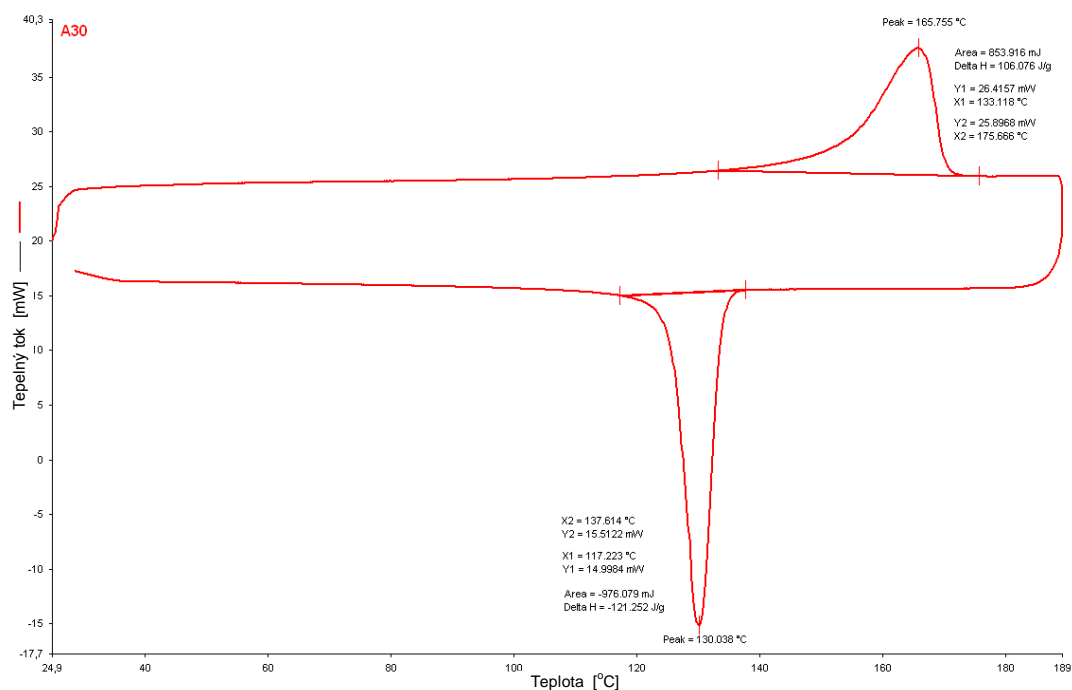


**Obr. P5.5** DSC termogram pro PP výstřik Mosten MT230 ( $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ),  
standardní temperace tvarové vložky **Moldmax HH** cirkulující vodou,  $T_{tm}=45^{\circ}\text{C}$

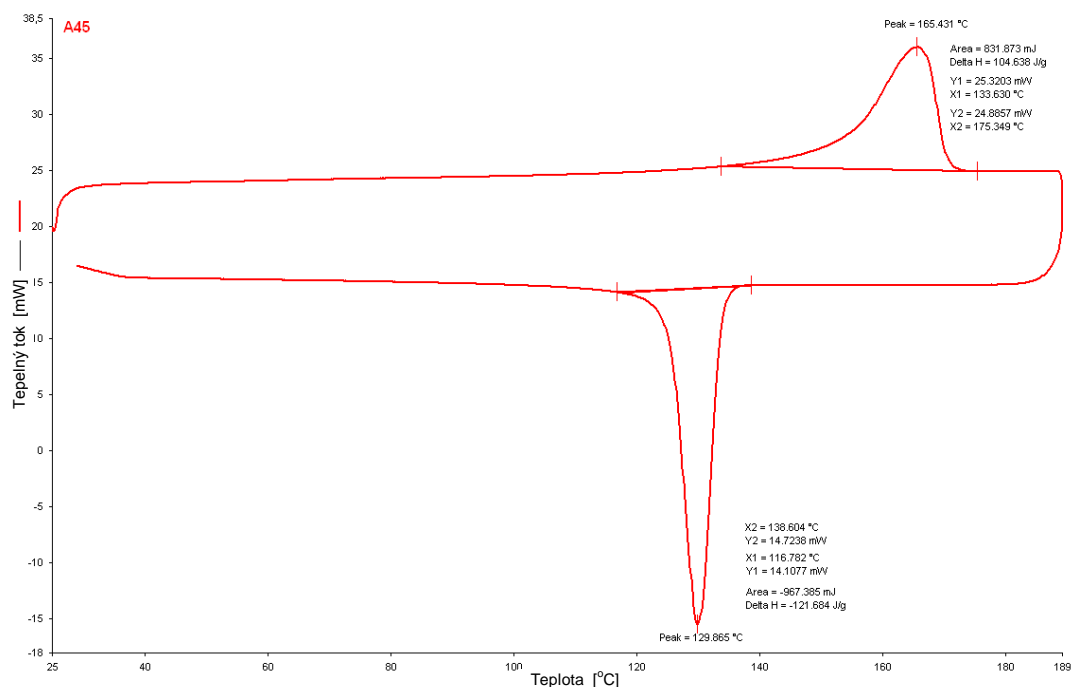


**Obr. P5.6** DSC termogram pro PP výstřik Mosten MT230 ( $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ),  
standardní temperace tvarové vložky **Moldmax HH** cirkulující vodou,  $T_{tm}=60^{\circ}\text{C}$

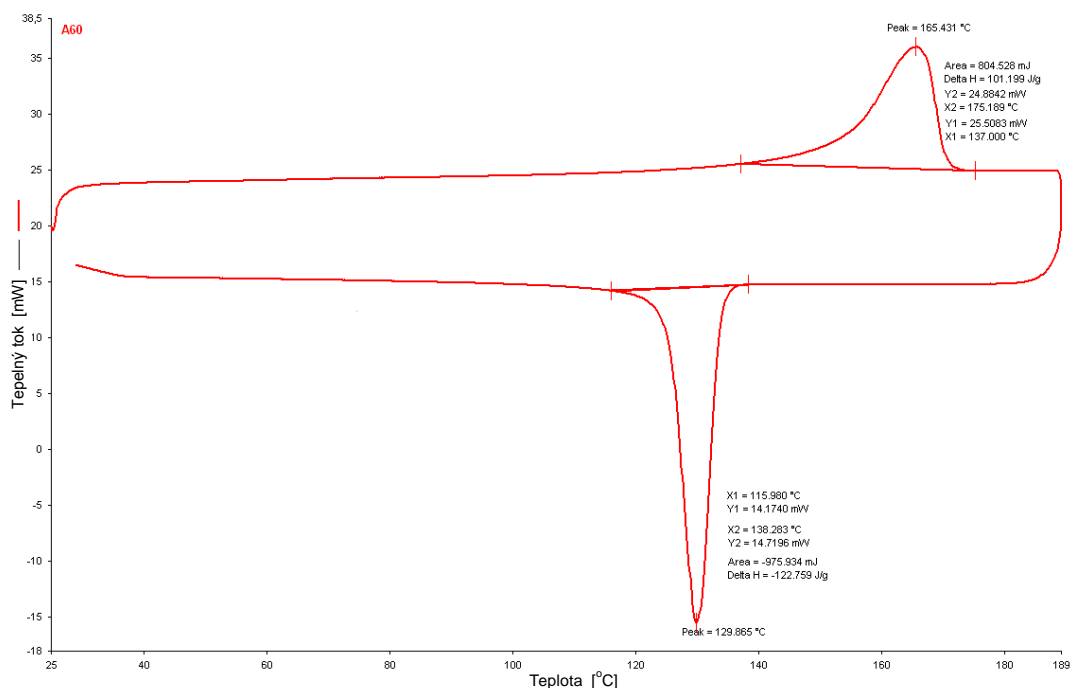




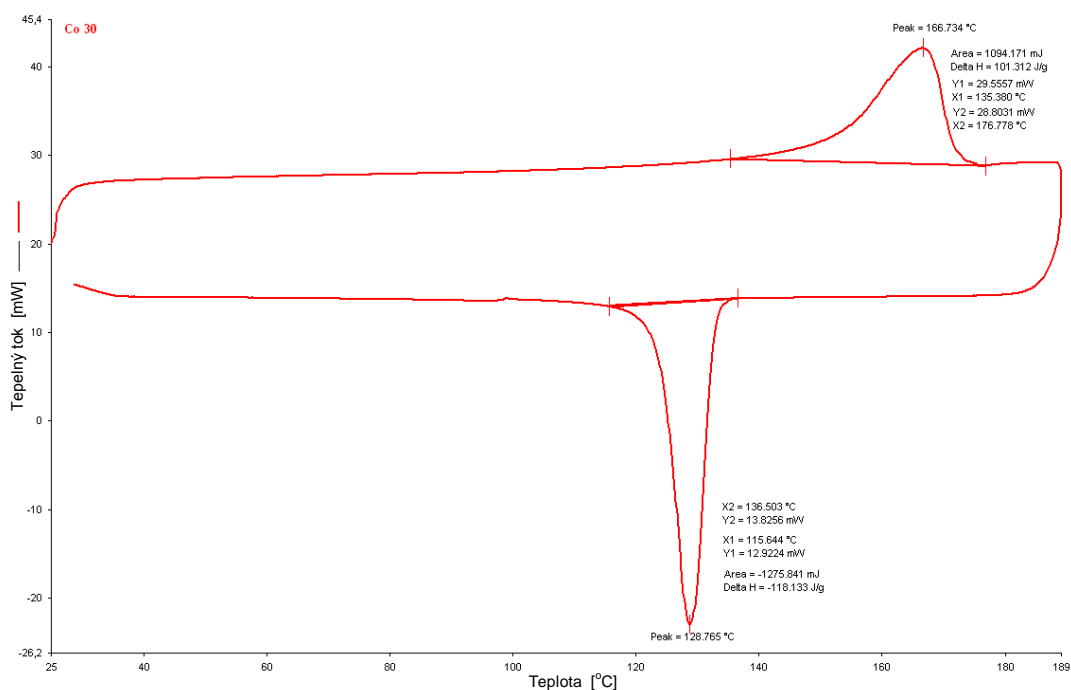
**Obr. P5.7** DSC termogram pro PP výstřik Mosten MT230 ( $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ),  
standardní temperace tvarové vložky Ampcoloy 940 cirkulující vodou,  $T_{\text{tm}}=30^{\circ}\text{C}$



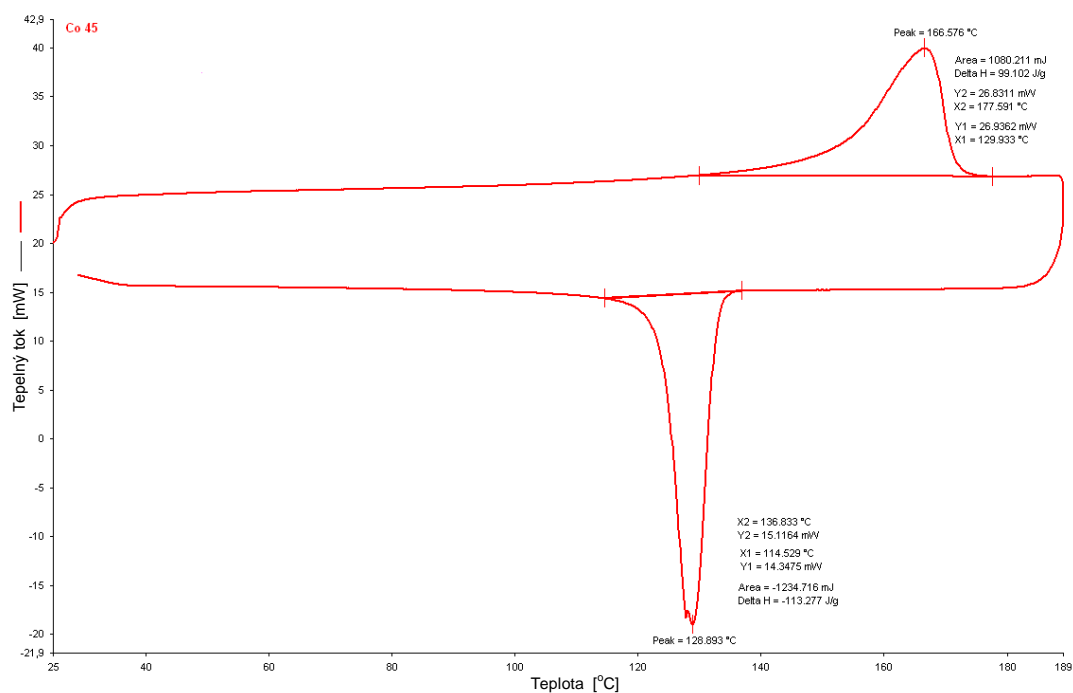
**Obr. P5.8** DSC termogram pro PP výstřik Mosten MT230 ( $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ),  
standardní temperace tvarové vložky Ampcoloy 940 cirkulující vodou,  $T_{\text{tm}}=45^{\circ}\text{C}$



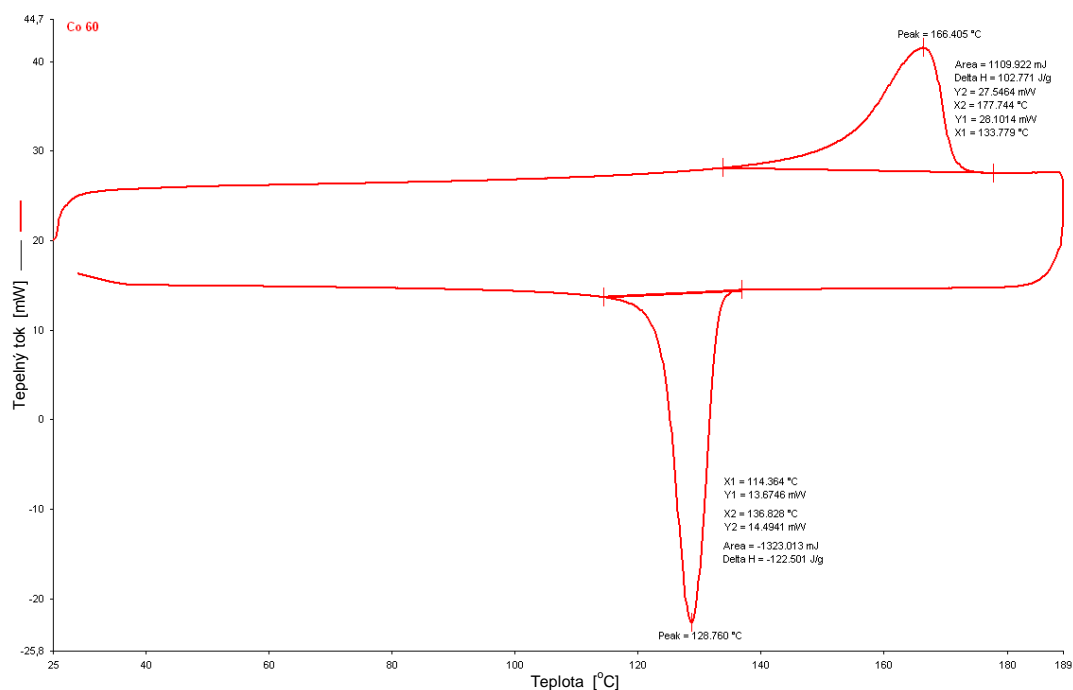
**Obr. P5.9** DSC termogram pro PP výstřik Mosten MT230 ( $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ),  
standardní teplota tvarové vložky Ampcoloy 940 cirkulující vodou,  $T_{\text{tm}}=60^{\circ}\text{C}$



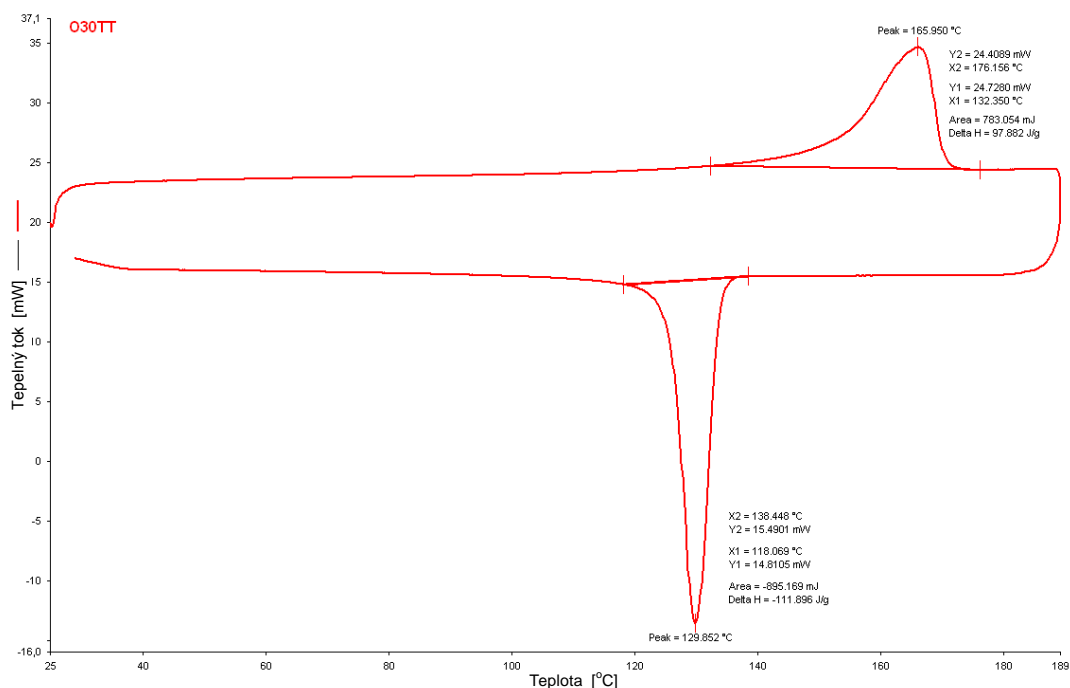
**Obr. P5.10** DSC termogram pro PP výstřik Mosten MT230 ( $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ),  
nekonvenční teplota ocelové tvarové vložky konformním chlazením,  $T_{\text{tm}}=30^{\circ}\text{C}$



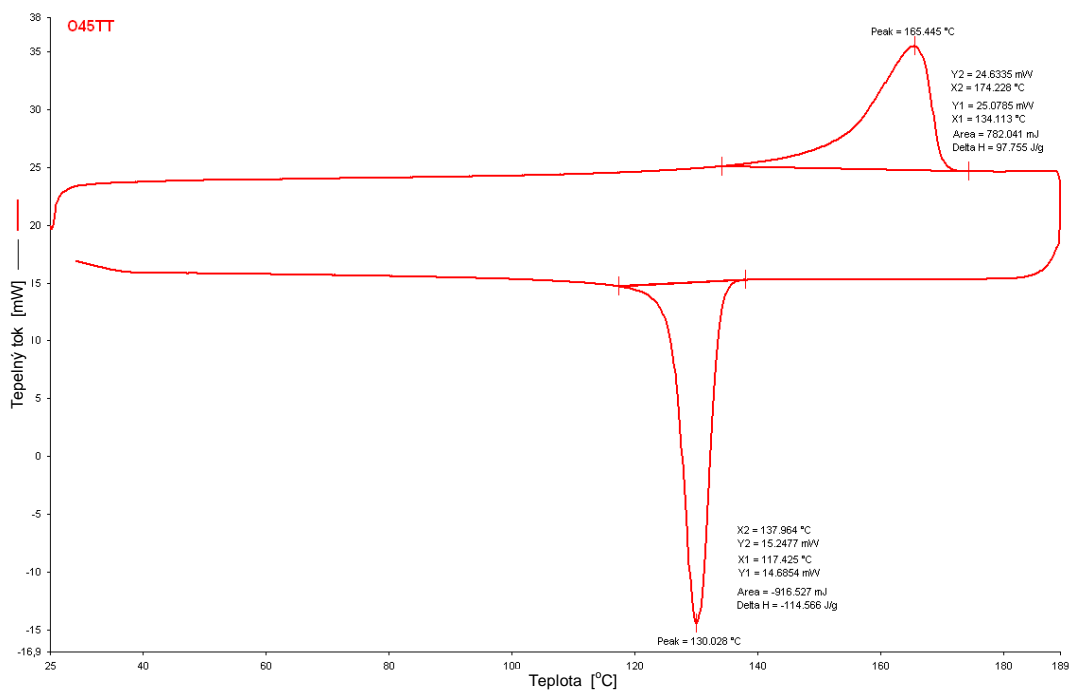
**Obr. P5.11** DSC termogram pro PP výstřik Mosten MT230 ( $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ),  
nekonvenční teplota ocelové tvarové vložky konformním chlazením,  $T_{tm}=45^{\circ}\text{C}$



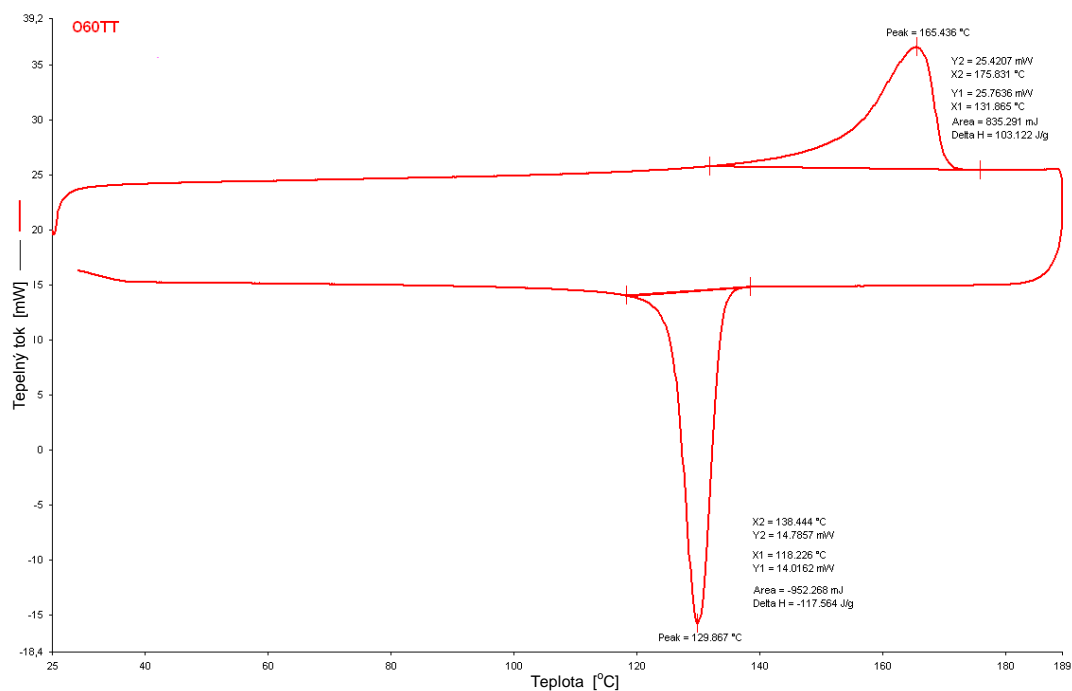
**Obr. P5.12** DSC termogram pro PP výstřik Mosten MT230 ( $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ),  
nekonvenční teplota ocelové tvarové vložky konformním chlazením,  $T_{tm}=60^{\circ}\text{C}$



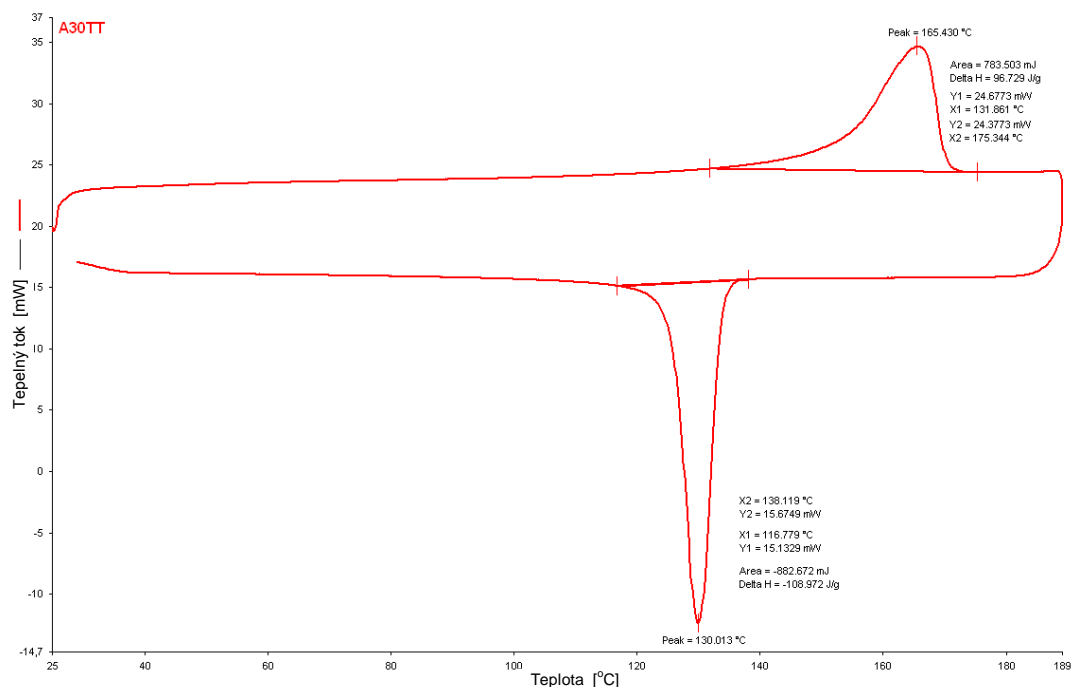
**Obr. P5.13** DSC termogram pro PP výstřik Mosten MT230 ( $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ),  
nekonvenční temperace ocelové tvarové vložky tepelnou trubicí,  $T_{tm}=30^{\circ}\text{C}$



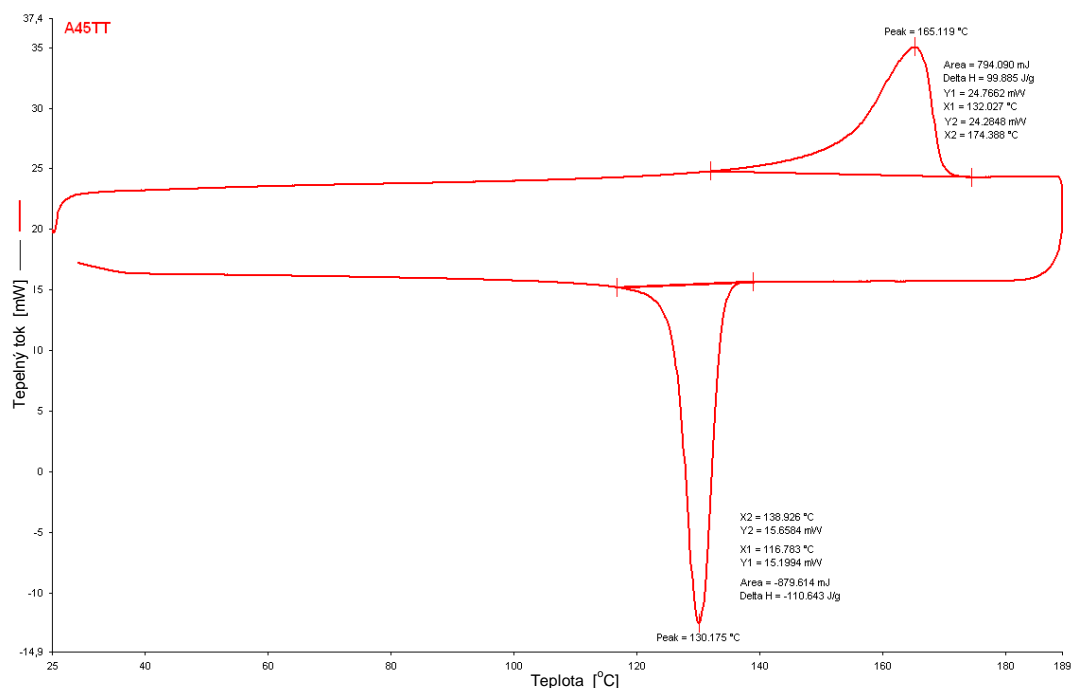
**Obr. P5.14** DSC termogram pro PP výstřik Mosten MT230 ( $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ),  
nekonvenční temperace ocelové tvarové vložky tepelnou trubicí,  $T_{tm}=45^{\circ}\text{C}$



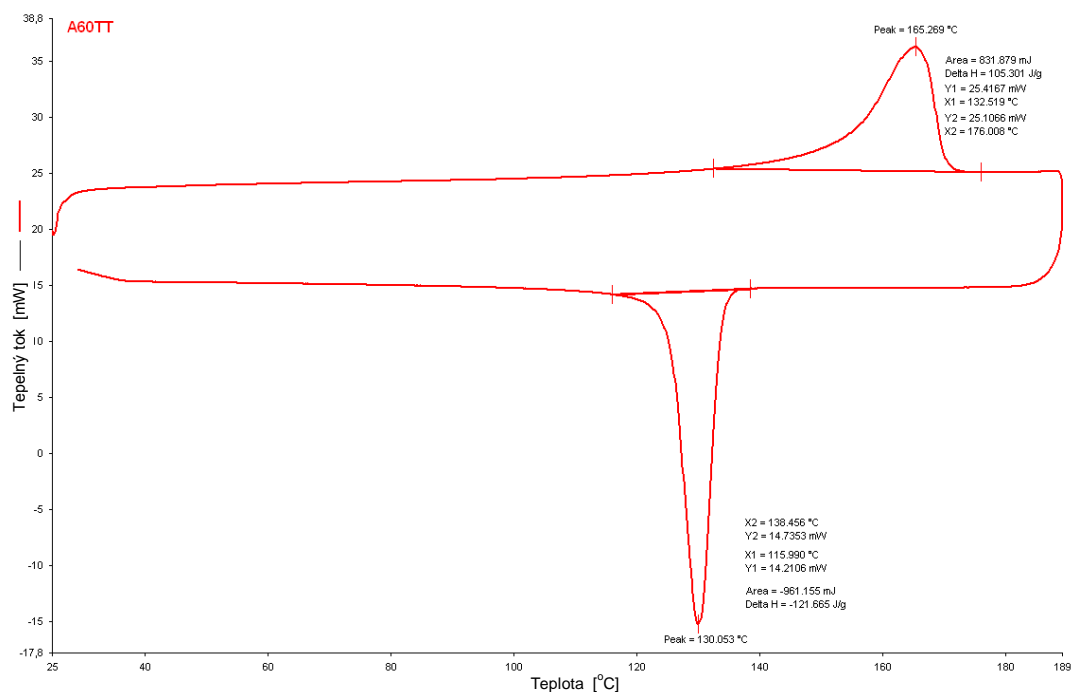
**Obr. P5.15** DSC termogram pro PP výstřik Mosten MT230 ( $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ),  
nekonvenční temperace ocelové tvarové vložky tepelnou trubicí,  $T_{tm}=60^{\circ}\text{C}$



**Obr. P5.16** DSC termogram pro PP výstřik Mosten MT230 ( $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ),  
nekonvenční temperace tvarové vložky Ampcoloy 940 tepelnou trubicí,  $T_{tm}=30^{\circ}\text{C}$



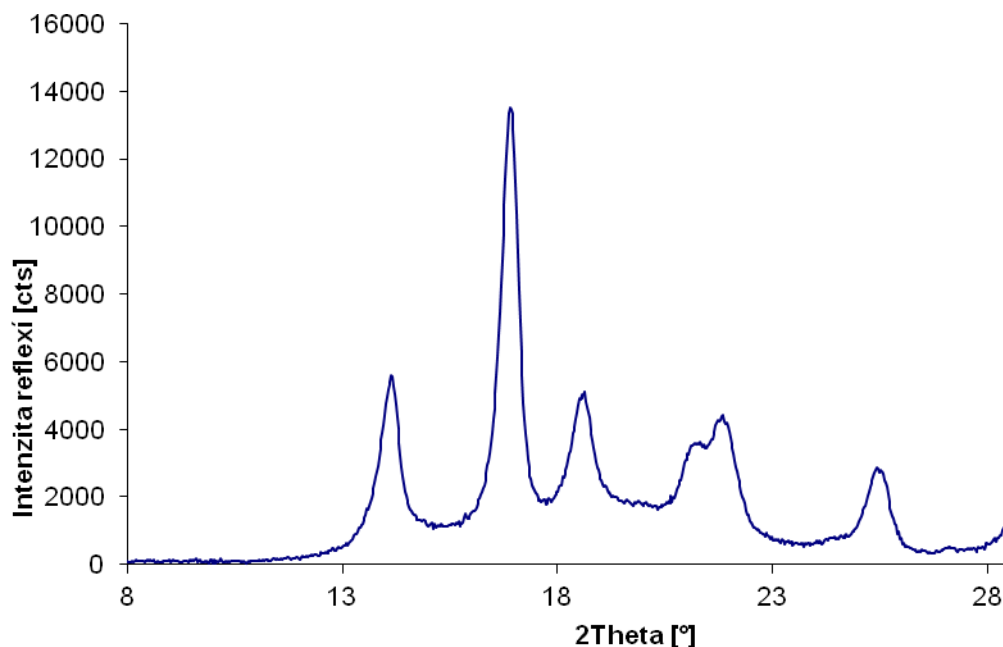
**Obr. P5.17** DSC termogram pro PP výstřik Mosten MT230 ( $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ),  
nekonvenční teploty tvarové vložky Ampcoloy 940 tepelnou trubicí,  $T_{tm}=45^{\circ}\text{C}$



**Obr. P5.18** DSC termogram pro PP výstřik Mosten MT230 ( $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ),  
nekonvenční teploty tvarové vložky Ampcoloy 940 tepelnou trubicí,  $T_{tm}=60^{\circ}\text{C}$



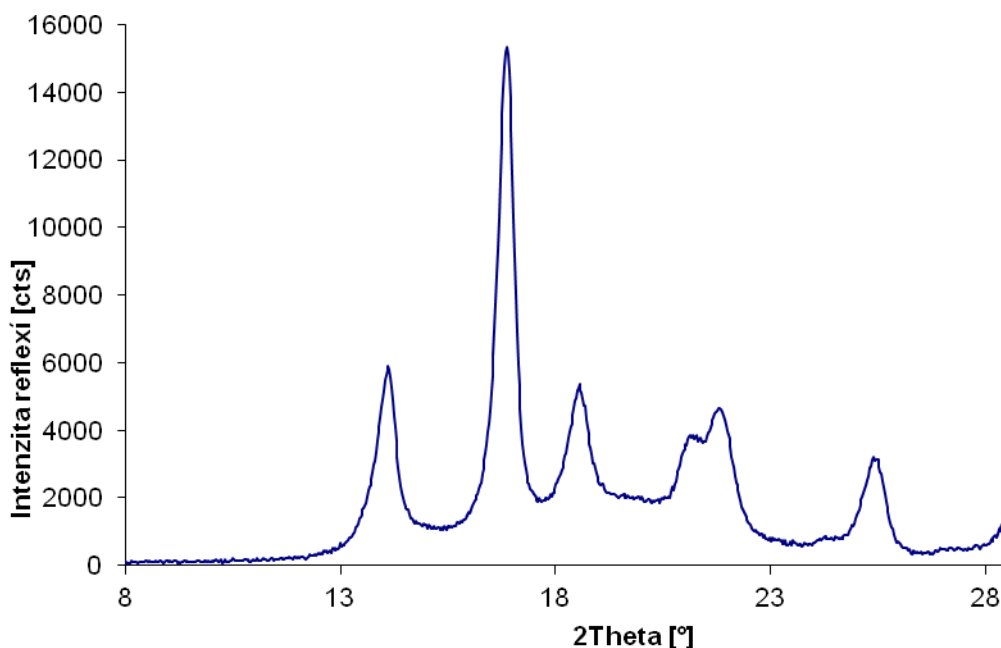
## Příloha 6: Záznamy a vyhodnocení difraktogramů (WAXS)



**Obr. P6.1** Difraktogram (XRD spektrum) pro PP výstřik Mosten MT 230, standardní (konvenční) **temperace ocelové tvarové vložky** s cirkulující vodou,  $T_{tm} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

**Tab. P6.1** Vyhodnocení difraktogramu: PP, standardní temperace, ocelová vložka,  $T_{tm} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Pík	$2\theta$ [ $^{\circ}$ ]	$I_k$ [cts]	$I_{k,rel}$ [%]	$A_k$ [cts $\cdot$ $^{\circ} 2\theta$ ]	$I_p$ [cts]	FWHM [ $^{\circ} 2\theta$ ]
1	14,0925	4611,67	38,38	1988,24	911,30	0,5058
2	16,8769	12015,80	100,00	4342,40	1649,96	0,4557
3	18,5622	3133,07	26,07	1313,68	1919,42	0,5385
4	21,1451	2051,01	17,07	811,86	1517,02	0,5909
5	21,8367	3053,78	25,41	1417,33	1302,07	0,6549
6	25,4275	2329,46	19,39	1076,51	568,95	0,5894
7	28,6268	745,82	6,21	469,66	436,77	0,8500

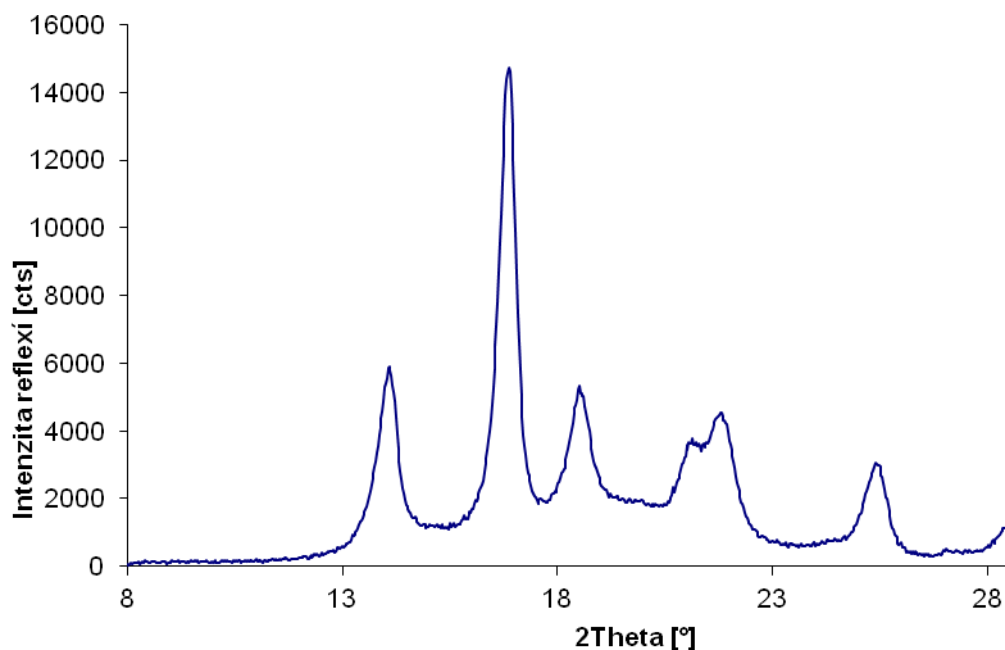


**Obr. P6.2** Difraktogram (XRD spektrum) pro PP výstřik Mosten MT 230,  
**standardní** (konvenční) **temperace ocelové tvarové vložky** s cirkulující vodou,  $T_{tm} = 45^{\circ}\text{C}$

**Tab. P6.2** Vyhodnocení difraktogramu: PP, standardní temperace, ocelová vložka,  $T_{tm} = 45^{\circ}\text{C}$

Pík	$2\theta$ [°]	$I_k$ [cts]	$I_{k,rel}$ [%]	$A_k$ [cts · ° $2\theta$ ]	$I_p$ [cts]	FWHM [° $2\theta$ ]
1	14,0601	4890,40	35,77	2134,67	887,90	0,5124
2	16,8340	13670,33	100,00	4723,28	1720,18	0,4333
3	18,5294	3192,05	23,35	1274,62	2048,23	0,5191
4	21,1236	2151,94	15,74	825,62	1680,51	0,5709
5	21,8113	3234,50	23,66	1470,51	1405,24	0,6415
6	25,3851	2633,79	19,27	1196,50	583,91	0,5714
7	28,6034	802,50	5,87	452,44	510,05	0,7596

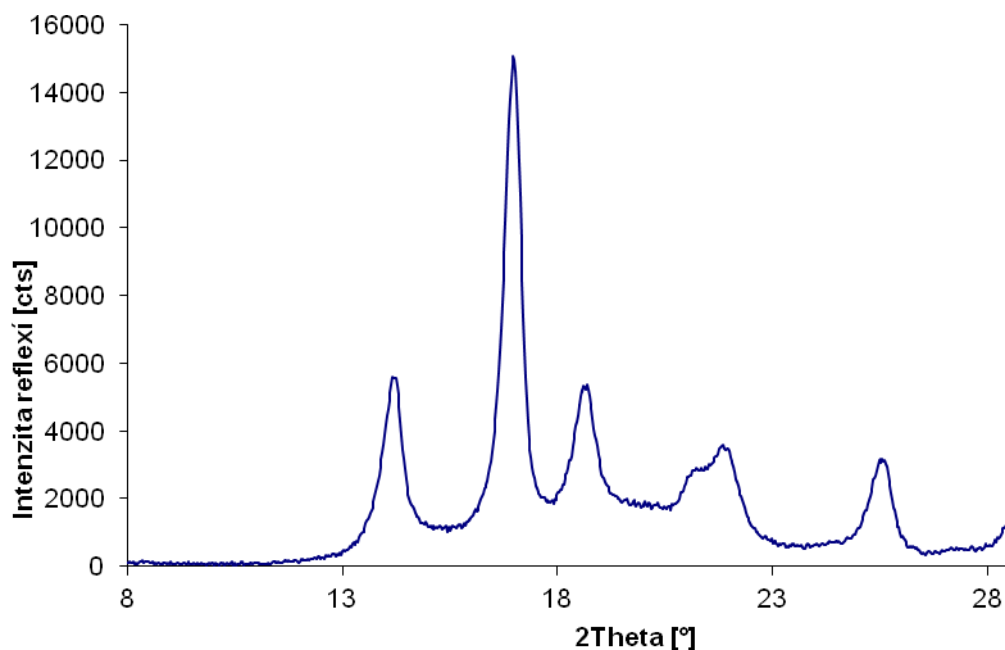




**Obr. P6.3** Difraktogram (XRD spektrum) pro PP výstřik Mosten MT 230, **standardní** (konvenční) **temperace ocelové** tvarové **vložky** s cirkulující vodou,  $T_{tm} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

**Tab. P6.3** Vyhodnocení difraktogramu: PP, standardní temperace, ocelová vložka,  $T_{tm} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

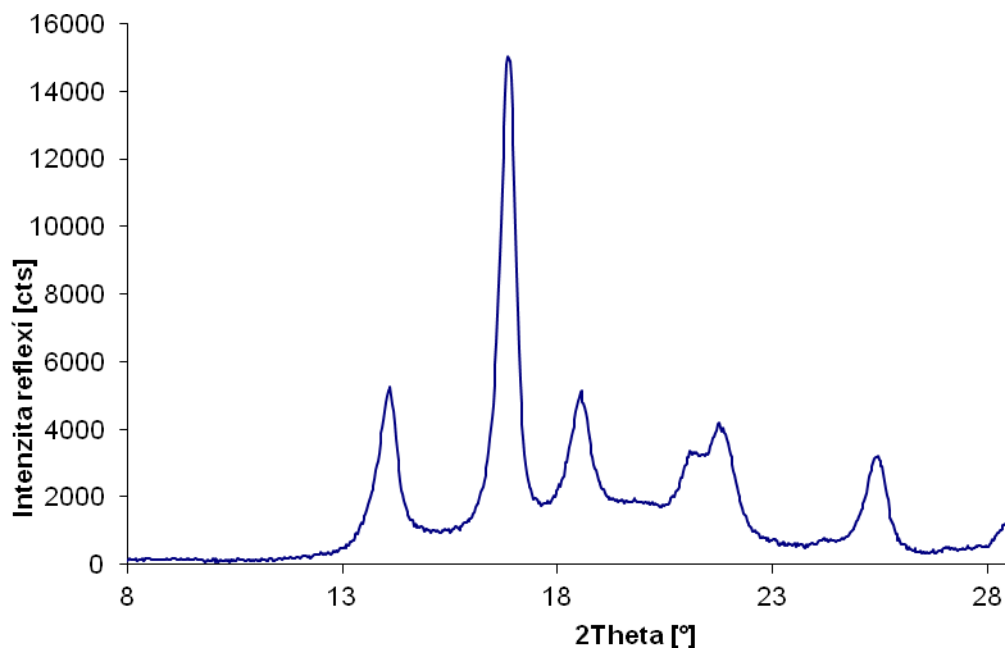
Pík	$2\theta$ [°]	$I_k$ [cts]	$I_{k,rel}$ [%]	$A_k$ [cts · ° $2\theta$ ]	$I_p$ [cts]	FWHM [° $2\theta$ ]
1	14,0444	4921,11	37,51	2105,51	910,41	0,5193
2	16,8258	13118,91	100,00	4627,80	1732,58	0,4424
3	18,5088	3224,52	24,58	1340,53	1992,76	0,5306
4	21,0865	2088,68	15,92	792,02	1573,54	0,5726
5	21,7882	3180,32	24,24	1514,28	1317,53	0,6668
6	25,3747	2482,48	18,92	1111,76	558,74	0,5805
7	28,5868	784,23	5,98	465,76	436,23	0,8014



**Obr. P6.4** Difraktogram (XRD spektrum) pro PP výstřik Mosten MT 230, standardní (konvenční) temperace tvarové vložky **Moldmax HH** cirkulující vodou,  $T_{tm} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

**Tab. P6.4** Vyhodnocení difraktogramu: PP, standardní temperace, vložka Moldmax,  $T_{tm} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

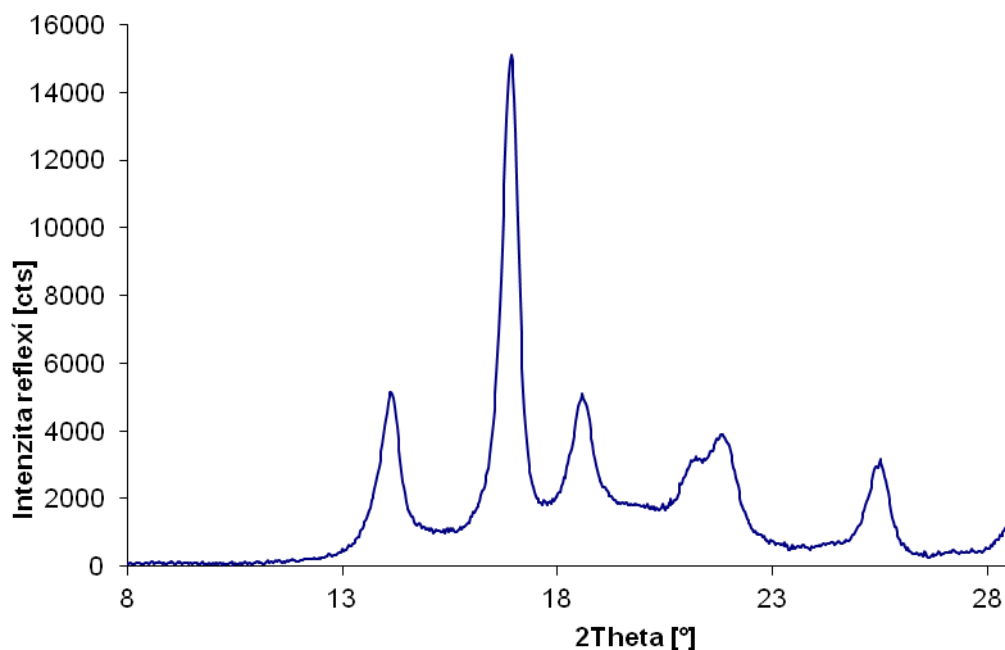
Pík	$2\theta$ [°]	$I_k$ [cts]	$I_{k,rel}$ [%]	$A_k$ [cts · ° $2\theta$ ]	$I_p$ [cts]	FWHM [° $2\theta$ ]
1	14,1573	4751,91	35,01	2062,13	858,06	0,5233
2	16,9436	13573,82	100,00	4892,86	1664,97	0,4509
3	18,6191	3470,65	25,57	1493,49	1912,01	0,5490
4	21,1789	1350,78	9,95	505,13	1524,30	0,5782
5	21,8670	2248,25	16,56	1063,50	1284,42	0,6686
6	25,4979	2582,85	19,03	1145,22	621,46	0,5679
7	28,6780	735,09	5,42	401,24	564,31	0,7624



**Obr. P6.5** Difraktogram (XRD spektrum) pro PP výstřik Mosten MT 230, standardní (konvenční) **temperace** tvarové vložky **Moldmax HH** cirkulující vodou,  $T_{tm} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$

**Tab. P6.5** Vyhodnocení difraktogramu: PP, standardní temperace, vložka Moldmax,  $T_{tm} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$

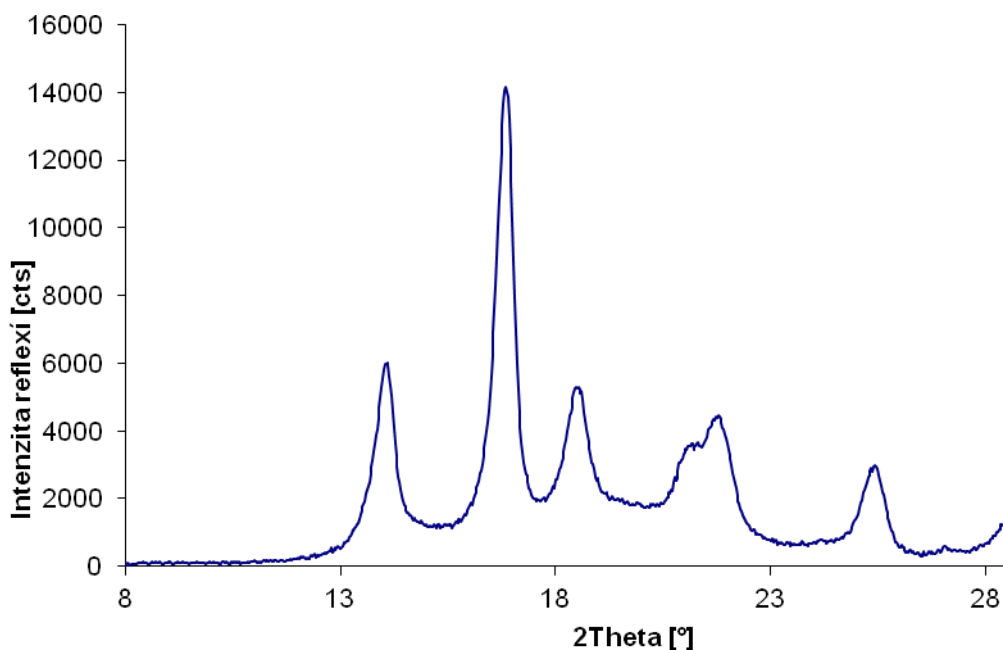
Pík	$2\theta$ [°]	$I_k$ [cts]	$I_{k,rel}$ [%]	$A_k$ [cts · ° 2 $\theta$ ]	$I_p$ [cts]	FWHM [°2 $\theta$ ]
1	14,0452	4363,71	31,81	1882,12	793,32	0,5152
2	16,8331	13716,44	100,00	4598,75	1575,08	0,4202
3	18,5138	3109,95	22,67	1244,71	1892,14	0,5159
4	21,1077	1767,43	12,89	631,40	1557,14	0,5428
5	21,7904	2803,45	20,44	1303,42	1277,32	0,6514
6	25,3886	2635,82	19,22	1124,66	597,92	0,5463
7	28,5900	762,89	5,56	443,85	473,85	0,8125



**Obr. P6.6** Difraktogram (XRD spektrum) pro PP výstřik Mosten MT 230, standardní (konvenční) temperace tvarové vložky **Moldmax HH** cirkulující vodou,  $T_{tm} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

**Tab. P6.6** Vyhodnocení difraktogramu: PP, standardní temperace, vložka Moldmax,  $T_{tm} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

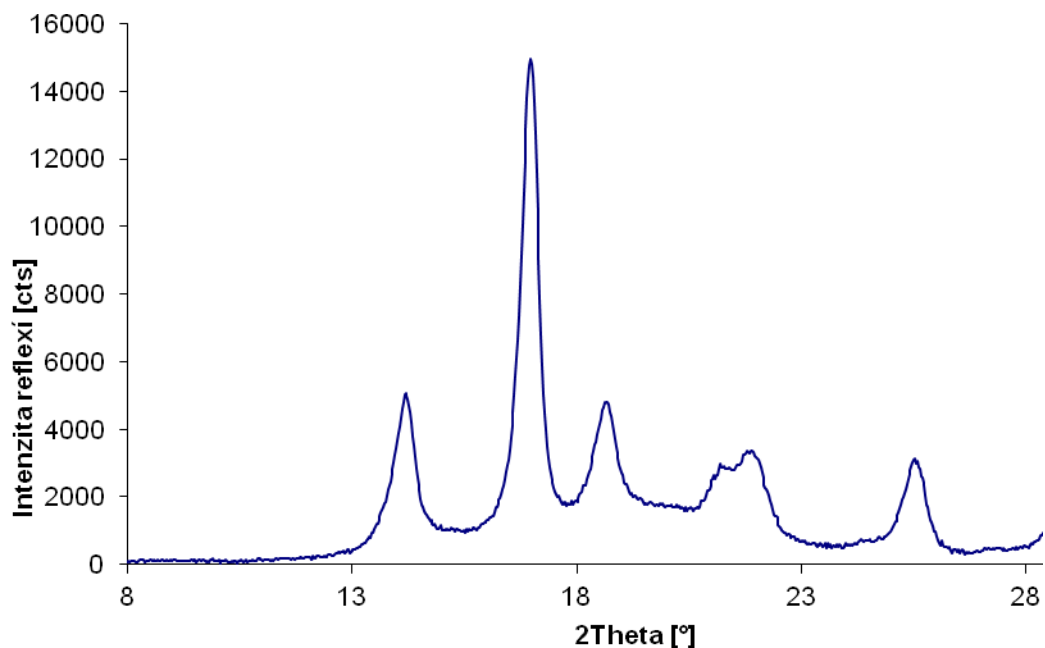
Pík	$2\theta$ [°]	$I_k$ [cts]	$I_{k,rel}$ [%]	$A_k$ [cts · ° $2\theta$ ]	$I_p$ [cts]	FWHM [° $2\theta$ ]
1	14,0928	4275,62	31,31	1859,54	827,11	0,5265
2	16,8864	13657,01	100,00	4826,40	1597,36	0,4394
3	18,5623	3188,43	23,35	1328,73	1883,41	0,5219
4	21,1452	1647,36	12,06	638,27	1507,15	0,5975
5	21,8336	2635,86	19,30	1254,76	1237,57	0,6716
6	25,4391	2563,91	18,77	1162,73	534,07	0,5595
7	28,6565	692,05	5,07	411,84	446,97	0,8321



**Obr. P6.7** Difraktogram (XRD spektrum) pro PP výstřik Mosten MT 230, standardní (konvenční) **temperace** tvarové vložky **Ampcoloy 940** cirkulující vodou,  $T_{tm} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

**Tab. P6.7** Vyhodnocení difraktogramu: PP, standardní temperace, vložka Ampcoloy,  $T_{tm} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

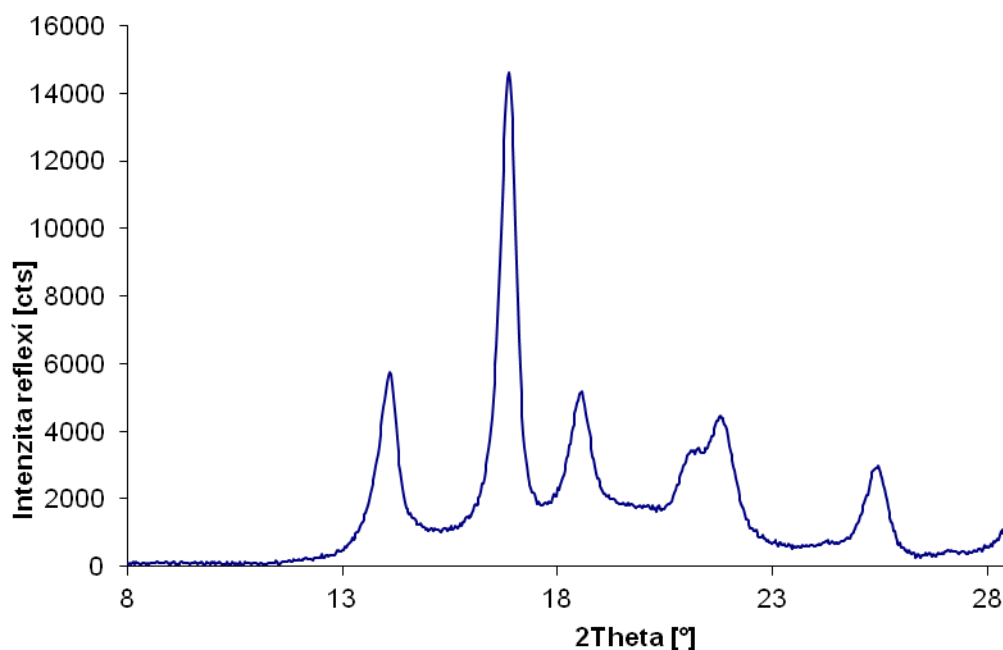
Pík	$2\theta$ [°]	$I_k$ [cts]	$I_{k,rel}$ [%]	$A_k$ [cts · ° $2\theta$ ]	$I_p$ [cts]	FWHM [° $2\theta$ ]
1	14,0257	5063,30	40,26	2147,82	952,19	0,5129
2	16,8097	12577,22	100,00	4531,58	1758,54	0,4559
3	18,4874	3369,32	26,79	1422,31	1986,48	0,5487
4	21,0790	1960,98	15,59	829,74	1566,97	0,6354
5	21,7757	3081,73	24,50	1432,09	1333,46	0,6661
6	25,3639	2326,27	18,50	1027,74	629,73	0,5882
7	27,0438	152,01	1,21	43,50	408,40	0,2559
8	28,5607	819,13	6,51	556,53	437,26	0,8607



**Obr. P6.8** Difraktogram (XRD spektrum) pro PP výstřik Mosten MT 230, standardní (konvenční) **temperace** tvarové vložky **Ampcoloy 940** cirkulující vodou,  $T_{tm} = 45\text{ °C}$

**Tab. P6.8** Vyhodnocení difraktogramu: PP, standardní temperace, vložka Ampcoloy,  $T_{tm} = 45\text{ °C}$

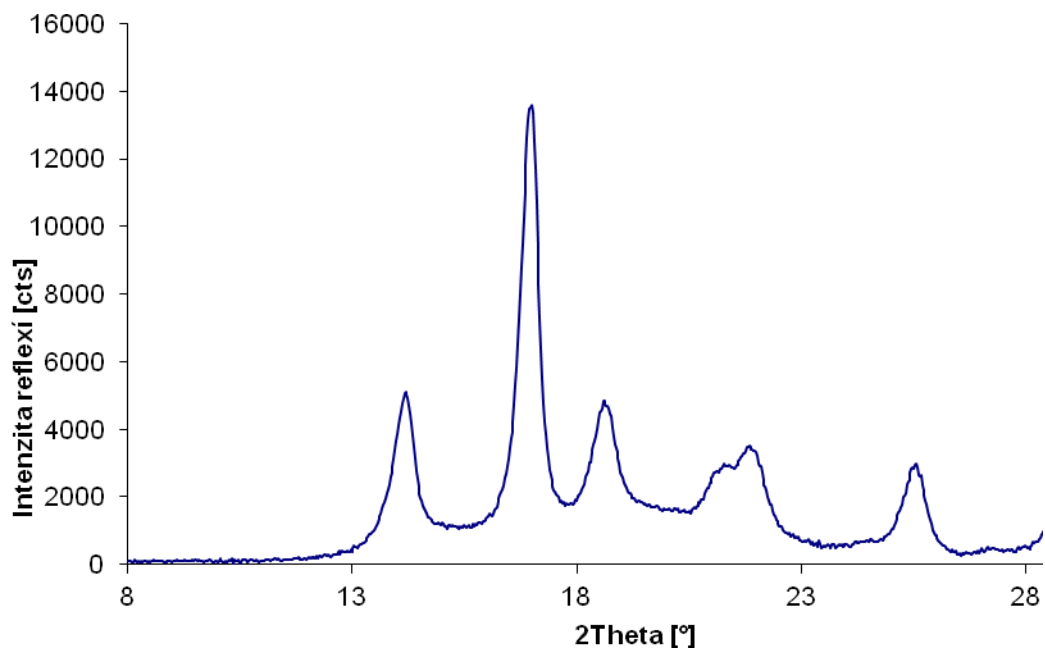
Pík	$2\theta$ [°]	$I_k$ [cts]	$I_{k,rel}$ [%]	$A_k$ [cts · ° $2\theta$ ]	$I_p$ [cts]	FWHM [° $2\theta$ ]
1	14,1548	4002,63	30,05	1729,25	813,54	0,5669
2	16,9420	13320,89	100,00	4599,91	1523,48	0,4494
3	18,6256	2986,82	22,42	1199,21	1810,59	0,5296
4	21,2110	1452,99	10,91	534,25	1464,73	0,5393
5	21,8791	2220,63	16,67	1051,50	1243,83	0,6356
6	25,4936	2521,94	18,93	1085,96	562,10	0,5578
7	28,6890	746,85	5,61	469,58	454,84	0,8223



**Obr. P6.9** Difraktogram (XRD spektrum) pro PP výstřik Mosten MT 230, standardní (konvenční) **temperace** tvarové vložky **Ampcoloy 940** cirkulující vodou,  $T_{tm} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

**Tab. P6.9** Vyhodnocení difraktogramu: PP, standardní temperace, vložka Ampcoloy,  $T_{tm} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Pík	$2\theta$ [ $^{\circ}$ ]	$I_k$ [cts]	$I_{k,rel}$ [%]	$A_k$ [cts $\cdot$ $^{\circ} 2\theta$ ]	$I_p$ [cts]	FWHM [ $^{\circ} 2\theta$ ]
1	14,0509	4840,97	37,16	2083,73	856,36	0,5085
2	16,8369	13027,46	100,00	4541,36	1656,26	0,4380
3	18,5207	3228,10	24,78	1313,06	1905,55	0,5241
4	21,0940	1922,27	14,76	757,41	1509,94	0,5830
5	21,7904	3123,02	23,97	1472,05	1283,89	0,6541
6	25,3853	2370,14	18,19	1025,76	566,46	0,5784
7	28,6225	752,30	5,77	468,73	429,59	0,8688

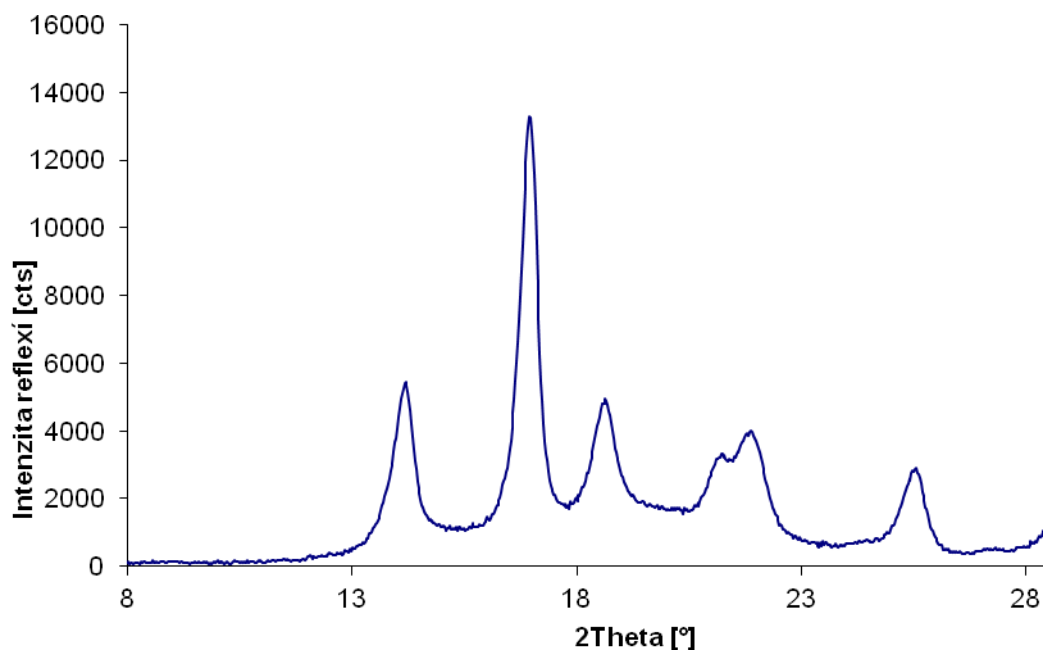


**Obr. P6.10** Difraktogram (XRD spektrum) pro PP výstřik Mosten MT 230, nekonvenční temperace ocelové tvarové vložky **konformním chlazením**,  $T_{tm} = 30\text{ °C}$

**Tab. P6.10** Vyhodnocení difraktogramu: PP, konformní chlazení, ocelová vložka,  $T_{tm} = 30\text{ °C}$

Pík	$2\theta$ [°]	$I_k$ [cts]	$I_{k,rel}$ [%]	$A_k$ [cts · ° $2\theta$ ]	$I_p$ [cts]	FWHM [° $2\theta$ ]
1	14,1488	4184,18	34,35	1775,29	884,75	0,5229
2	16,9382	12179,39	100,00	4328,29	1584,63	0,4481
3	18,6042	3023,83	24,83	1300,25	1792,53	0,5629
4	21,1918	1476,55	12,12	639,99	1407,21	0,6422
5	21,8755	2262,47	18,58	1005,60	1209,22	0,6408
6	25,4896	2374,90	19,50	1044,92	553,90	0,5662
7	28,6907	678,79	5,57	420,38	414,08	0,8657

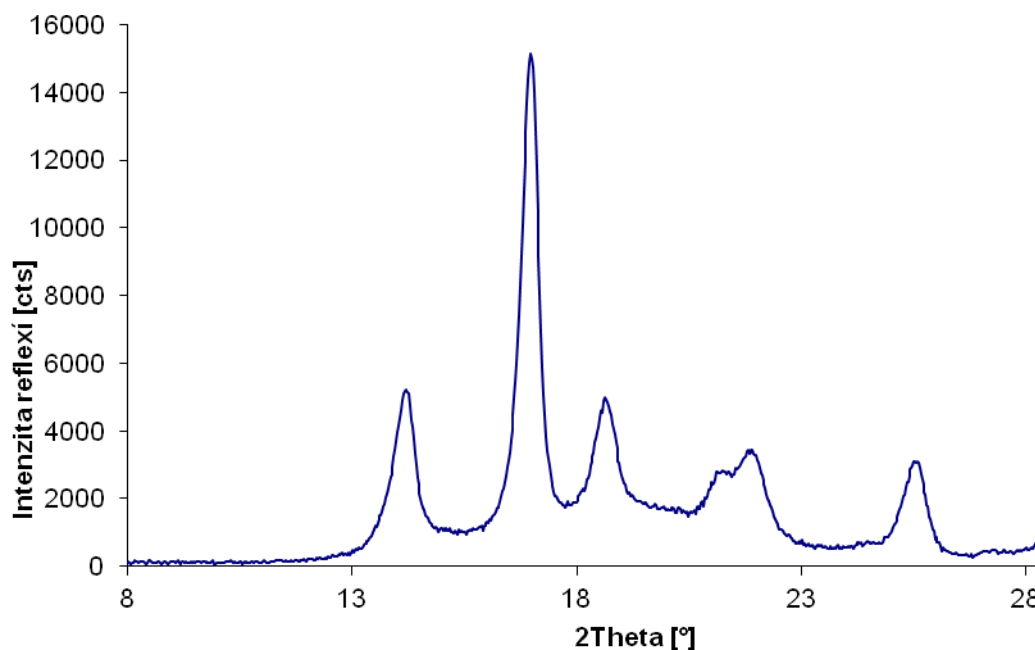




**Obr. P6.11** Difraktogram (XRD spektrum) pro PP výstřik Mosten MT 230, nekonvenční temperace ocelové tvarové vložky **konformním chlazením**,  $T_{tm} = 45\text{ °C}$

**Tab. P6.11** Vyhodnocení difraktogramu: PP, konformní chlazení, ocelová vložka,  $T_{tm} = 45\text{ °C}$

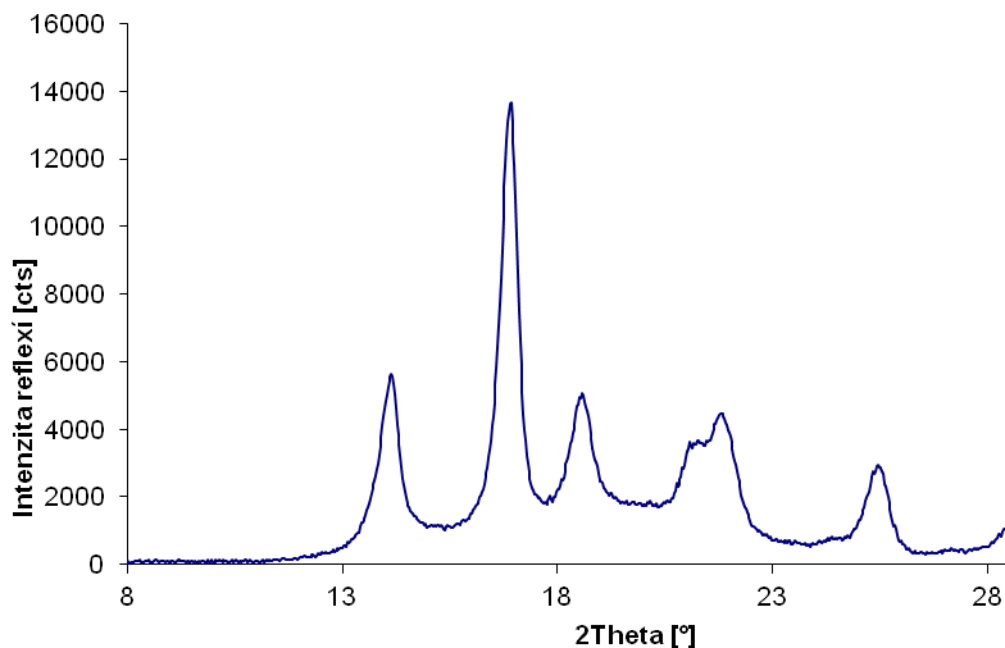
Pík	2θ [°]	$I_k$ [cts]	$I_{k,rel}$ [%]	$A_k$ [cts · ° 2θ]	$I_p$ [cts]	FWHM [°2θ]
1	14,1379	4495,33	38,01	1924,66	893,50	0,5153
2	16,9215	11827,51	100,00	4175,80	1552,88	0,4381
3	18,6010	3064,38	25,91	1285,44	1793,73	0,5540
4	21,1636	1792,03	15,15	656,01	1481,37	0,5337
5	21,8535	2813,67	23,79	1356,72	1288,13	0,6446
6	25,4727	2239,32	18,93	990,98	615,74	0,5756
7	28,6679	777,55	6,57	514,08	443,23	0,8668



**Obr. P6.12** Difraktogram (XRD spektrum) pro PP výstřik Mosten MT 230, nekonvenční temperace ocelové tvarové vložky **konformním chlazením**,  $T_{tm} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

**Tab. P6.12** Vyhodnocení difraktogramu: PP, konformní chlazení, ocelová vložka,  $T_{tm} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

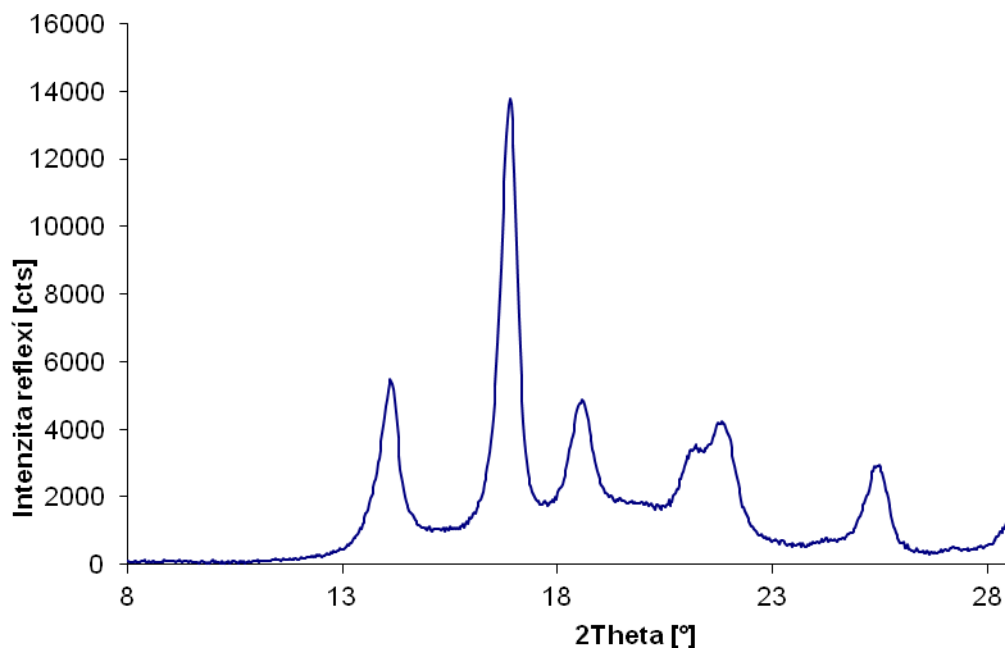
Pík	2θ [°]	$I_k$ [cts]	$I_{k,rel}$ [%]	$A_k$ [cts · ° 2θ]	$I_p$ [cts]	FWHM [°2θ]
1	14,1542	4395,28	32,17	1875,16	850,61	0,5295
2	16,9430	13662,72	100,00	4680,31	1595,19	0,4344
3	18,6224	3144,24	23,01	1295,27	1837,48	0,5286
4	21,1739	1375,33	10,07	517,18	1420,62	0,5695
5	21,8732	2258,57	16,53	1107,52	1169,22	0,6796
6	25,4947	2536,83	18,57	1094,88	571,23	0,5674
7	28,7181	748,08	5,48	434,37	439,38	0,8110



**Obr. P6.13** Difraktogram (XRD spektrum) pro PP výstřik Mosten MT 230, nekonvenční temperace ocelové tvarové vložky tepelnou trubicí,  $T_{tm} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

**Tab. P6.13** Vyhodnocení difraktogramu: PP, temperace tepelnou trubicí, ocelová vložka,  $T_{tm} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

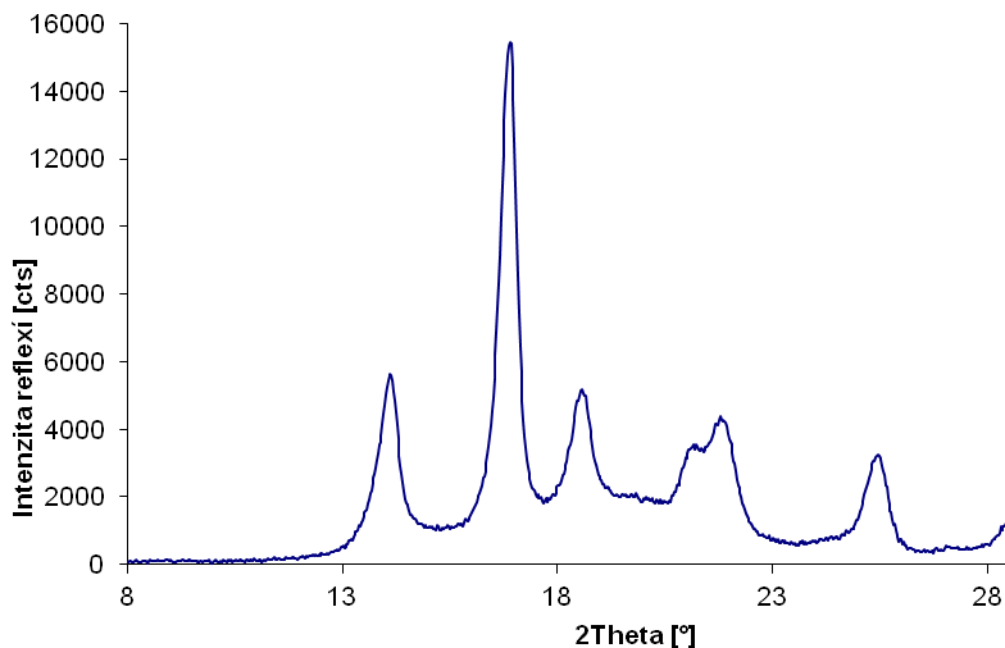
Pík	$2\theta$ [°]	$I_k$ [cts]	$I_{k,rel}$ [%]	$A_k$ [cts · ° 2 $\theta$ ]	$I_p$ [cts]	FWHM [°2 $\theta$ ]
1	14,0817	4705,62	38,87	2048,67	871,02	0,5109
2	16,8652	12104,73	100,00	4324,88	1643,00	0,4506
3	18,5446	3131,79	25,87	1304,71	1907,89	0,5404
4	21,1300	2035,20	16,81	788,74	1557,93	0,5856
5	21,8207	3067,90	25,34	1433,73	1349,10	0,6634
6	25,4154	2455,87	20,29	1139,07	508,51	0,5801
7	28,6155	704,21	5,82	435,67	414,07	0,8550



**Obr. P6.14** Difraktogram (XRD spektrum) pro PP výstřik Mosten MT 230, nekonvenční temperace ocelové tvarové vložky tepelnou trubicí,  $T_{tm} = 45^\circ\text{C}$

**Tab. P6.14** Vyhodnocení difraktogramu: PP, temperace tepelnou trubicí, ocelová vložka,  $T_{tm} = 45^\circ\text{C}$

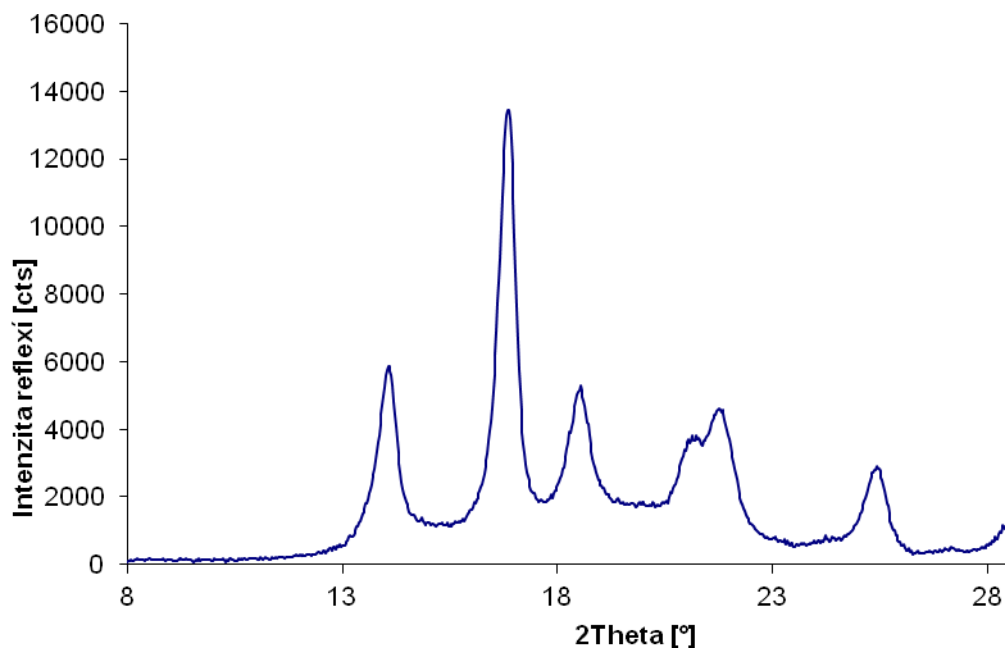
Pík	$2\theta$ [°]	$I_k$ [cts]	$I_{k,rel}$ [%]	$A_k$ [cts · ° 2 $\theta$ ]	$I_p$ [cts]	FWHM [°2 $\theta$ ]
1	14,0812	4570,06	37,23	1941,30	831,41	0,5076
2	16,8569	12273,58	100,00	4321,21	1563,09	0,4488
3	18,5420	3019,36	24,60	1244,44	1852,70	0,5519
4	21,1340	1886,72	15,37	732,59	1540,26	0,5799
5	21,8201	2939,39	23,95	1355,88	1274,02	0,6541
6	25,4026	2419,58	19,71	1115,97	552,55	0,5835
7	27,1645	74,48	0,61	22,56	408,94	0,3070
8	28,6108	752,65	6,13	450,38	461,01	0,8364



**Obr. P6.15** Difraktogram (XRD spektrum) pro PP výstřik Mosten MT 230, nekonvenční temperace ocelové tvarové vložky tepelnou trubicí,  $T_{tm} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

**Tab. P6.15** Vyhodnocení difraktogramu: PP, temperace tepelnou trubicí, ocelová vložka,  $T_{tm} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

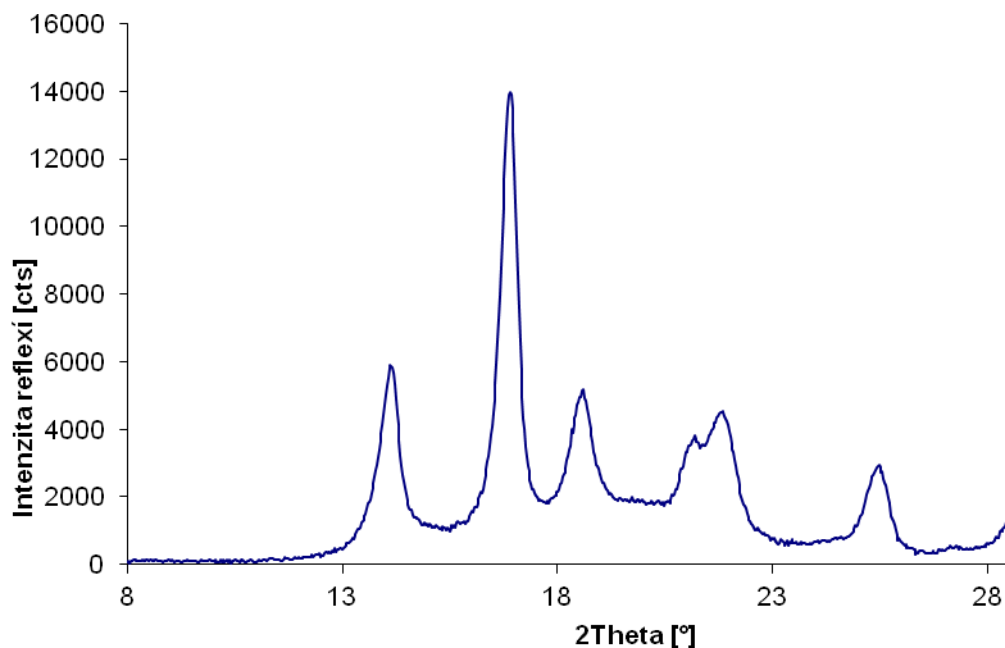
Pík	$2\theta$ [°]	$I_k$ [cts]	$I_{k,rel}$ [%]	$A_k$ [cts · ° 2 $\theta$ ]	$I_p$ [cts]	FWHM [°2 $\theta$ ]
1	14,0652	4720,39	33,70	2036,07	869,51	0,5212
2	16,8457	14007,92	100,00	4896,00	1636,29	0,4398
3	18,5381	3176,89	22,68	1261,59	2013,27	0,5156
4	21,1206	1866,48	13,32	667,10	1644,60	0,5365
5	21,8069	2929,56	20,91	1358,91	1380,59	0,6534
6	25,3939	2620,45	18,71	1149,76	639,34	0,5707
7	28,6083	820,04	5,85	494,09	459,51	0,8182



**Obr. P6.16** Difraktogram (XRD spektrum) pro PP výstřik Mosten MT 230, nekonvenční temperace tvarové vložky Ampcoloy 940 tepelnou trubicí,  $T_{tm} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

**Tab. P6.16** Vyhodnocení difraktogramu: PP, tepelná trubice, vložka Ampcoloy,  $T_{tm} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

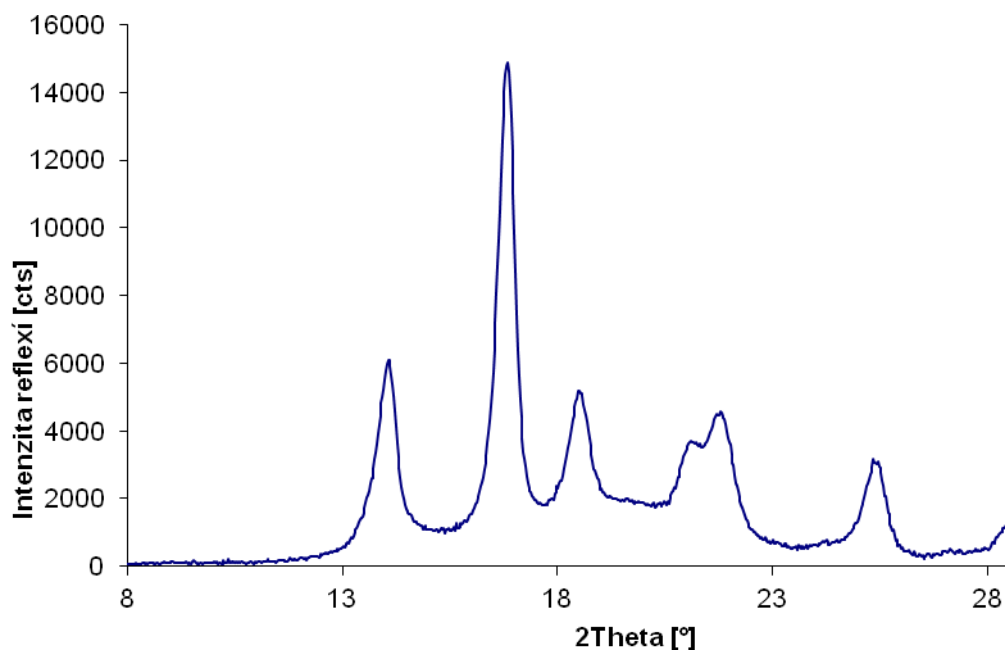
Pík	$2\theta$ [°]	$I_k$ [cts]	$I_{k,rel}$ [%]	$A_k$ [cts · ° 2 $\theta$ ]	$I_p$ [cts]	FWHM [°2 $\theta$ ]
1	14,0364	4919,90	41,03	2091,49	933,05	0,4985
2	16,8161	11989,67	100,00	4279,54	1642,98	0,4472
3	18,4960	3299,73	27,52	1387,01	1892,06	0,5394
4	21,0698	2193,34	18,29	883,20	1515,97	0,6070
5	21,7703	3275,68	27,32	1576,23	1300,75	0,6707
6	25,3766	2370,38	19,77	1108,55	541,63	0,5740
7	28,5819	716,55	5,98	454,33	394,73	0,8785



**Obr. P6.17** Difraktogram (XRD spektrum) pro PP výstřik Mosten MT 230, nekonvenční temperace tvarové vložky Ampcoloy 940 tepelnou trubicí,  $T_{tm} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$

**Tab. P6.17** Vyhodnocení difraktogramu: PP, tepelná trubice, vložka Ampcoloy,  $T_{tm} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$

Pík	$2\theta$ [°]	$I_k$ [cts]	$I_{k,rel}$ [%]	$A_k$ [cts · ° 2 $\theta$ ]	$I_p$ [cts]	FWHM [°2 $\theta$ ]
1	14,0871	5035,30	40,33	2188,95	850,47	0,5096
2	16,8602	12486,52	100,00	4466,53	1616,56	0,4438
3	18,5453	3201,84	25,64	1356,72	1904,10	0,5533
4	21,1129	2059,88	16,50	746,12	1603,33	0,5475
5	21,8059	3151,77	25,24	1479,67	1358,03	0,6616
6	25,4096	2361,67	18,91	1076,35	571,48	0,5890
7	28,6341	728,31	5,83	442,42	465,96	0,8493



**Obr. P6.18** Difraktogram (XRD spektrum) pro PP výstřik Mosten MT230, nekonvenční temperace tvarové vložky Ampcoloy 940 tepelnou trubicí,  $T_{tm} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

**Tab. P6.18** Vyhodnocení difraktogramu: PP, tepelná trubice, vložka Ampcoloy,  $T_{tm} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Pík	$2\theta$ [°]	$I_k$ [cts]	$I_{k,rel}$ [%]	$A_k$ [cts · ° $2\theta$ ]	$I_p$ [cts]	FWHM [° $2\theta$ ]
1	14,0232	5168,32	38,52	2227,42	872,87	0,5167
2	16,7979	13418,32	100,00	4682,67	1639,09	0,4434
3	18,4942	3257,20	24,27	1309,61	1924,33	0,5208
4	21,0736	2074,29	15,46	790,52	1586,86	0,5676
5	21,7683	3229,67	24,07	1510,88	1322,46	0,6573
6	25,3575	2580,32	19,23	1125,92	543,13	0,5663
7	28,5949	777,92	5,80	457,76	430,62	0,8093





## Příloha 7: Záznamy a vyhodnocení mechanických vlastností výstřiků

**Tab. P7.1** Tahové vlastnosti výstřiků v závislosti na tepelné vodivosti materiálu tvarové vložky

Vlastnost	Vzorek	Konvenční přepážkový systém temperace								
		Ocelová vložka			Vložka Moldmax HH			Vložka Ampcoloy 940		
		30 °C	45 °C	60 °C	30 °C	45 °C	60 °C	30 °C	45 °C	60 °C
$\sigma_m$ [MPa]	1	34,1	35,7	35,4	34,0	34,3	35,8	34,0	33,9	34,6
	2	34,7	35,9	34,6	34,8	34,2	35,8	34,0	34,3	34,0
	3	33,9	34,5	34,8	34,7	34,2	35,1	33,7	34,1	34,4
	4	34,9	-	34,0	34,5	34,8	35,4	34,2	34,4	34,0
	5	34,3	34,0	34,5	34,3	34,2	35,5	33,6	33,9	33,9
	6	34,5	34,1	34,5	34,1	34,7	35,5	33,8	33,5	34,0
	7	34,1	34,0	34,9	33,8	34,4	34,9	33,3	33,3	33,9
	8	34,2	35,2	34,4	33,9	34,1	35,3	33,5	33,5	34,0
	9	34,0	33,7	34,3	33,8	33,9	35,4	33,4	33,5	34,3
	10	-	35,0	34,0	34,3	34,6	35,2	32,8	33,4	34,4
	$\mu$	<b>34,3</b>	<b>34,7</b>	<b>34,5</b>	<b>34,2</b>	<b>34,3</b>	<b>35,4</b>	<b>33,6</b>	<b>33,8</b>	<b>34,1</b>
	$s_r$	$\pm 0,3$	$\pm 0,8$	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$	$\pm 0,3$
	$P$	$\pm 0,2$	$\pm 0,6$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$	$\pm 0,2$
$\varepsilon_{tm}$ [%]	1	20,1	19,0	23,1	20,6	22,0	21,0	18,0	18,5	19,8
	2	19,8	18,0	24,3	19,5	17,6	23,5	19,2	18,7	18,2
	3	21,5	21,4	21,3	20,4	18,4	21,7	17,4	20,8	20,9
	4	20,9	-	20,0	19,5	19,1	20,8	16,4	20,1	19,5
	5	23,8	25,8	18,9	21,3	19,6	22,7	18,1	20,6	21,5
	6	21,5	23,9	21,3	20,5	19,6	20,5	18,1	22,5	17,9
	7	23,2	23,9	22,2	20,3	18,9	21,1	18,5	23,1	21,7
	8	21,5	19,9	20,2	20,4	19,5	19,7	17,6	22,4	22,2
	9	21,3	20,4	18,7	20,4	21,4	21,2	19,1	18,9	22,6
	10	-	23,0	23,3	20,9	19,7	19,1	17,3	20,6	20,2
	$\mu$	<b>21,5</b>	<b>21,7</b>	<b>21,3</b>	<b>20,4</b>	<b>19,6</b>	<b>21,1</b>	<b>18,0</b>	<b>20,6</b>	<b>20,5</b>
	$s_r$	$\pm 1,2$	$\pm 2,5$	$\pm 1,8$	$\pm 0,5$	$\pm 1,2$	$\pm 1,2$	$\pm 0,8$	$\pm 1,6$	$\pm 1,5$
	$P$	$\pm 0,9$	$\pm 1,9$	$\pm 1,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,9$	$\pm 0,9$	$\pm 0,6$	$\pm 1,1$	$\pm 1,1$

Poznámka:  $P$  (95 %) - interval spolehlivosti je určen za předpokladu Studentova rozdělení ( $t$ -rozdělení)



**Tab. P7.2** Tahové vlastnosti výstřiků v závislosti na geometrickém faktoru temperačních kanálů

Vlastnost	Vzorek	Ocelová tvarová vložka					
		Konvenční temperace			Konformní chlazení		
		30 °C	45 °C	60 °C	30 °C	45 °C	60 °C
$\sigma_m$ [MPa]	1	34,1	35,7	35,4	33,9	34,5	34,2
	2	34,7	35,9	34,6	33,6	33,6	33,8
	3	33,9	34,5	34,8	33,8	33,9	33,9
	4	34,9	-	34,0	33,6	34,2	34,6
	5	34,3	34,0	34,5	33,4	34,4	34,3
	6	34,5	34,1	34,5	33,9	33,6	33,9
	7	34,1	34,0	34,9	34,2	33,8	34,1
	8	34,2	35,2	34,4	33,7	34,2	34,4
	9	34,0	33,7	34,3	33,5	34,0	34,0
	10	-	35,0	34,0	33,9	33,9	34,3
	$\mu$	<b>34,3</b>	<b>34,7</b>	<b>34,5</b>	<b>33,8</b>	<b>34,0</b>	<b>34,2</b>
	$s_r$	$\pm 0,3$	$\pm 0,8$	$\pm 0,4$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,2$
	$P$	$\pm 0,2$	$\pm 0,6$	$\pm 0,3$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$
$\varepsilon_{tm}$ [%]	1	20,1	19,0	23,1	20,4	21,8	22,7
	2	19,8	18,0	24,3	19,9	20,2	19,5
	3	21,5	21,4	21,3	20,1	20,9	23,0
	4	20,9	-	20,0	20,3	21,6	20,8
	5	23,8	25,8	18,9	19,7	19,9	19,5
	6	21,5	23,9	21,3	20,1	20,4	21,9
	7	23,2	23,9	22,2	20,3	21,2	20,5
	8	21,5	19,9	20,2	19,9	21,6	20,3
	9	21,3	20,4	18,7	20,6	20,4	20,6
	10	-	23,0	23,3	21,4	20,1	21,4
	$\mu$	<b>21,5</b>	<b>21,7</b>	<b>21,3</b>	<b>20,3</b>	<b>20,8</b>	<b>21,0</b>
	$s_r$	$\pm 1,2$	$\pm 2,5$	$\pm 1,8$	$\pm 0,5$	$\pm 0,7$	$\pm 1,2$
	$P$	$\pm 0,9$	$\pm 1,9$	$\pm 1,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,9$

Poznámka:  $P$  (95 %) - interval spolehlivosti je určen za předpokladu Studentova rozdělení ( $t$ -rozdělení)



**Tab. P7.3** Tahové vlastnosti výstřiků v závislosti na temperačním prostředí tvarové vložky

Vlastnost	Vzorek	Konvenční temperace			Tepelná trubice					
		Ocelová vložka			Ocelová vložka			Vložka Ampcoloy 940		
		30 °C	45 °C	60 °C	30 °C	45 °C	60 °C	30 °C	45 °C	60 °C
$\sigma_m$ [MPa]	1	34,1	35,7	35,4	34,8	35,0	35,0	32,6	33,4	34,0
	2	34,7	35,9	34,6	34,6	34,9	35,0	32,7	34,1	34,1
	3	33,9	34,5	34,8	34,6	34,6	35,3	32,6	33,5	33,9
	4	34,9	-	34,0	34,2	34,4	34,6	32,5	33,5	33,5
	5	34,3	34,0	34,5	34,4	34,4	35,1	33,6	33,6	33,9
	6	34,5	34,1	34,5	34,5	34,9	34,0	33,7	33,4	33,7
	7	34,1	34,0	34,9	34,8	34,7	35,0	33,2	33,3	34,0
	8	34,2	35,2	34,4	34,2	34,6	34,9	33,3	33,8	33,7
	9	34,0	33,7	34,3	34,5	35,1	35,3	32,9	33,6	34,2
	10	-	35,0	34,0	34,3	34,6	34,2	-	33,9	33,9
	$\mu$	<b>34,3</b>	<b>34,7</b>	<b>34,5</b>	<b>34,5</b>	<b>34,7</b>	<b>34,8</b>	<b>33,0</b>	<b>33,6</b>	<b>33,9</b>
	$s_r$	± 0,3	± 0,8	± 0,4	± 0,2	± 0,2	± 0,4	± 0,4	± 0,2	± 0,2
	$P$	± 0,2	± 0,6	± 0,3	± 0,1	± 0,1	± 0,3	± 0,3	± 0,1	± 0,1
$\varepsilon_{tm}$ [%]	1	20,1	19,0	23,1	19,1	23,6	22,9	19,8	19,6	19,4
	2	19,8	18,0	24,3	20,7	21,7	19,5	18,7	18,5	19,4
	3	21,5	21,4	21,3	20,7	21,4	17,3	19,1	17,7	20,2
	4	20,9	-	20,0	19,3	22,1	19,6	19,6	21,0	19,2
	5	23,8	25,8	18,9	17,4	21,0	17,7	19,9	19,4	19,1
	6	21,5	23,9	21,3	22,8	22,1	20,9	17,3	22,0	21,3
	7	23,2	23,9	22,2	20,5	18,6	17,4	19,7	20,3	18,5
	8	21,5	19,9	20,2	23,3	21,4	22,2	21,1	19,5	19,7
	9	21,3	20,4	18,7	22,1	21,7	20,6	20,2	19,9	19,9
	10	-	23,0	23,3	21,4	20,1	17,6	-	16,7	20,1
	$\mu$	<b>21,5</b>	<b>21,7</b>	<b>21,3</b>	<b>20,7</b>	<b>21,4</b>	<b>19,6</b>	<b>19,5</b>	<b>19,5</b>	<b>19,7</b>
	$s_r$	± 1,2	± 2,5	± 1,8	± 1,7	± 1,3	± 2,0	± 1,0	± 1,5	± 0,7
	$P$	± 0,9	± 1,9	± 1,3	± 1,2	± 0,9	± 1,4	± 0,8	± 1,1	± 0,5

Poznámka:  $P$  (95 %) - interval spolehlivosti je určen za předpokladu Studentova rozdělení ( $t$ -rozdělení)



**Tab. P7.4** Ohybové vlastnosti výstřiků v závislosti na tepelné vodivosti materiálu tvarové vložky

Vlastnost	Vzorek	Konvenční přepážkový systém temperace								
		Ocelová vložka			Vložka Moldmax HH			Vložka Ampcoloy 940		
		30 °C	45 °C	60 °C	30 °C	45 °C	60 °C	30 °C	45 °C	60 °C
$\sigma_{lm}$ [MPa]	1	61,8	68,9	74,7	66,0	66,5	69,1	65,5	69,3	70,1
	2	62,4	69,8	73,7	65,2	71,7	70,2	66,0	69,1	69,3
	3	62,2	72,0	73,4	66,0	66,3	67,3	66,5	67,6	68,3
	4	62,6	68,1	70,6	64,7	66,2	68,1	66,7	69,0	68,2
	5	62,8	65,9	71,4	65,5	63,8	69,9	65,0	67,5	67,7
	$\mu$	<b>62,4</b>	<b>68,9</b>	<b>72,8</b>	<b>65,5</b>	<b>66,9</b>	<b>68,9</b>	<b>65,9</b>	<b>68,5</b>	<b>68,7</b>
	$s_r$	$\pm 0,3$	$\pm 2,0$	$\pm 1,5$	$\pm 0,5$	$\pm 2,6$	$\pm 1,1$	$\pm 0,6$	$\pm 0,8$	$\pm 0,9$
	$P$	$\pm 0,4$	$\pm 2,5$	$\pm 1,9$	$\pm 0,6$	$\pm 3,2$	$\pm 1,4$	$\pm 0,7$	$\pm 1,0$	$\pm 1,1$
$E_f$ [MPa]	1	1594	1617	1633	1638	1514	1619	1664	1497	1746
	2	1487	1667	1659	1416	1614	1675	1770	1726	1750
	3	1580	1594	1737	1799	1655	1823	1692	1578	1859
	4	1536	1589	1605	1443	1633	1748	1760	1736	1727
	5	1549	1617	1532	1716	1463	1508	1433	1355	1673
	$\mu$	<b>1549</b>	<b>1617</b>	<b>1633</b>	<b>1602</b>	<b>1576</b>	<b>1675</b>	<b>1664</b>	<b>1578</b>	<b>1751</b>
	$s_r$	$\pm 37$	$\pm 28$	$\pm 67$	$\pm 150$	$\pm 74$	$\pm 108$	$\pm 122$	$\pm 144$	$\pm 61$
	$P$	$\pm 46$	$\pm 35$	$\pm 83$	$\pm 186$	$\pm 92$	$\pm 134$	$\pm 152$	$\pm 179$	$\pm 76$

Poznámka:  $P$  (95 %) - interval spolehlivosti je určen za předpokladu Studentova rozdělení ( $t$ -rozdělení)



**Tab. P7.5** Ohybové vlastnosti výstřiků v závislosti na geometrickém faktoru temperačních kanálů

Vlastnost	Vzorek	Ocelová tvarová vložka					
		Konvenční temperace			Konformní chlazení		
		30 °C	45 °C	60 °C	30 °C	45 °C	60 °C
$\sigma_{lm}$ [MPa]	1	61,8	68,9	74,7	62,4	68,2	71,5
	2	62,4	69,8	73,7	62,1	67,1	70,2
	3	62,2	72,0	73,4	62,6	67,2	70,4
	4	62,6	68,1	70,6	61,9	67,7	71,6
	5	62,8	65,9	71,4	62,2	68,0	70,0
	$\mu$	<b>62,4</b>	<b>68,9</b>	<b>72,8</b>	<b>62,2</b>	<b>67,6</b>	<b>70,7</b>
	$s_r$	$\pm 0,3$	$\pm 2,0$	$\pm 1,5$	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$	$\pm 0,7$
	$P$	$\pm 0,4$	$\pm 2,5$	$\pm 1,9$	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	$\pm 0,9$
$E_f$ [MPa]	1	1594	1617	1633	1433	1488	1590
	2	1487	1667	1659	1412	1520	1532
	3	1580	1594	1737	1460	1565	1545
	4	1536	1589	1605	1420	1490	1518
	5	1549	1617	1532	1360	1511	1603
	$\mu$	<b>1549</b>	<b>1617</b>	<b>1633</b>	<b>1417</b>	<b>1515</b>	<b>1558</b>
	$s_r$	$\pm 37$	$\pm 28$	$\pm 67$	$\pm 33$	$\pm 28$	$\pm 33$
	$P$	$\pm 46$	$\pm 35$	$\pm 83$	$\pm 41$	$\pm 35$	$\pm 41$

Poznámka:  $P$  (95 %) - interval spolehlivosti je určen za předpokladu Studentova rozdělení ( $t$ -rozdělení)



**Tab. P7.6** Ohybové vlastnosti výstřiků v závislosti na temperačním prostředí tvarové vložky

Vlastnost	Vzorek	Konvenční temperace			Tepelná trubice					
		Ocelová vložka			Ocelová vložka			Vložka Ampcoloy 940		
		30 °C	45 °C	60 °C	30 °C	45 °C	60 °C	30 °C	45 °C	60 °C
$\sigma_{lm}$ [MPa]	1	61,8	68,9	74,7	65,0	63,1	73,3	66,7	62,4	64,5
	2	62,4	69,8	73,7	63,7	66,5	73,9	64,8	65,3	66,6
	3	62,2	72,0	73,4	65,4	67,2	73,4	66,2	65,8	65,8
	4	62,6	68,1	70,6	65,4	65,6	73,0	67,0	65,0	66,0
	5	62,8	65,9	71,4	63,9	66,6	74,1	65,7	62,6	65,6
	$\mu$	<b>62,4</b>	<b>68,9</b>	<b>72,8</b>	<b>64,7</b>	<b>65,8</b>	<b>73,5</b>	<b>66,1</b>	<b>64,2</b>	<b>65,7</b>
	$s_r$	± 0,3	± 2,0	± 1,5	± 0,7	± 1,4	± 0,4	± 0,8	± 1,4	± 0,7
	$P$	± 0,4	± 2,5	± 1,9	± 0,9	± 1,7	± 0,5	± 1,0	± 1,7	± 0,9
$E_f$ [MPa]	1	1594	1617	1633	1677	1628	1808	1404	1536	1694
	2	1487	1667	1659	1687	1614	1745	1448	1589	1754
	3	1580	1594	1737	1516	1708	1843	1399	1594	1703
	4	1536	1589	1605	1585	1700	1706	1531	1599	1624
	5	1549	1617	1532	1614	1698	1696	1351	1628	1609
	$\mu$	<b>1549</b>	<b>1617</b>	<b>1633</b>	<b>1616</b>	<b>1670</b>	<b>1760</b>	<b>1427</b>	<b>1589</b>	<b>1677</b>
	$s_r$	± 37	± 28	± 67	± 63	± 40	± 57	± 61	± 30	± 54
	$P$	± 46	± 35	± 83	± 78	± 50	± 71	± 76	± 37	± 67

Poznámka:  $P$  (95 %) - interval spolehlivosti je určen za předpokladu Studentova rozdělení ( $t$ -rozdělení)



## Příloha 8: Výpočet součinitele prostupu tepla mezi formou a teplotním médiem (vodou)

Výpočet součinitele prostupu tepla mezi formou a teplotním médiem na čele tvarové vložky z oceli 16MnCr5, slitiny mědi Ampcoloy 940 a Moldmax HH je pro standardní temperační systém s plochou přepážkou (viz kap. 4.1.2), resp. pro konformní systém chlazení v tvarové vložce z oceli X5CrNiCuNb16-4 (viz kap. 4.1.2.3) stanoven na základě rovnice (2.9) a (2.10) pro příklad cirkulující vody o teplotě 60 °C. Fyzikální vlastnosti teplotního média při teplotě 60 °C a materiálu formy jsou uvedeny v tab. P8.1. Za předpokladu rychlosti proudění teplotního média v kruhovém průřezu kanálu rozděleného plochou přepážkou (tedy půlkruhového průřezu, při zanedbání tloušťky stěny přepážky) 1 m/s, je rychlost proudění teplotního média v oválném průřezu temperačního kanálu konformního způsobu chlazení (viz tab. P8.1) stanovena na základě rovnice kontinuity (P8.1). Reynoldsovo číslo pro stanovení součinitele přestupu tepla mezi stěnou temperačního kanálu a teplotním médiem je určeno z rovnice (P8.2).

$$c_1^* \cdot S_{k1} = c_2^* \cdot S_{k2} \quad (\text{P8.1})$$

$$Re = \frac{c^* \cdot d_h}{\nu} \quad (\text{P8.2})$$

kde značí:  $c^*$  rychlost proudění teplotního média v temperačních kanálech [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $S_k$  průřez temperačního kanálu [ $\text{m}^2$ ],  $d_h$  hydraulicky rovnocenný průměr temperačního kanálu, který nahrazuje rozměry nekruhového temperačního kanálu jedním rozměrem [ $\text{m}$ ], stanovený z rovnice P8.3 a  $\nu$  kinematickou viskozitu média [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ].

$$d_h = \frac{4 \cdot S_k}{o} \quad (\text{P8.3})$$

kde značí:  $S_k$  průřez nekruhového temperačního kanálu [ $\text{m}^2$ ] a  $o$  obvod kanálu [ $\text{m}$ ].

**Tab. P8.1** Fyzikální vlastnosti materiálu formy a teplotního média při 60 °C [126, 128, 129, 139]

Značka	Jednotka	Typická hodnota			
Vlastnosti teplotního média (vody)					
$c^*$	$[m \cdot s^{-1}]$	1,0 (pro kruhový průřez kanálu rozdělený přepážkou); 6,6 (pro oválný průřez kanálu)			
$\nu$	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	$0,475 \cdot 10^{-6}$			
$Pr$	$[1]$	2,98			
$\lambda_{tm}$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	0,655			
Vlastnosti formy		16MnCr5	Moldmax HH	Ampcoloy 940	X5CrNiCuNb16-4
$\lambda_f$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	45	110	208	14



### Výpočet hydraulicky rovnocenného průměru temperačního kanálu:

- kruhový průřez temperačního kanálu (rozměry viz příloha 2)

$$d_h = \frac{4 \cdot S_k}{o} = 2 \cdot r = 2 \cdot 8,2 \cdot 10^{-3} = 16,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Vzhledem ke skutečnosti, že u standardního vrtaného temperačního kanálu je tento rozdělen na dvě části plochou přepážkou (viz kap. 4.1.2), je nutno dále počítat s hodnotou hydraulicky rovnocenného průměru temperačního kanálu  $d_h/2$ , odpovídající půlkruhovému kanálu (tloušťka stěny ploché přepážky je zanedbána).

- oválný průřez temperačního kanálu (rozměry viz příloha 4)

$$d_h = \frac{4 \cdot S_k}{o} = \frac{4 \cdot (\pi \cdot r^2 + a^2)}{2 \cdot \pi \cdot r + 2 \cdot a} = \frac{4 \cdot [\pi \cdot (1,5 \cdot 10^{-3})^2 + (3 \cdot 10^{-3})^2]}{2 \cdot \pi \cdot (1,5 \cdot 10^{-3}) + 2 \cdot (3 \cdot 10^{-3})} = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

### Výpočet Reynoldsova čísla

- půlkruhový průřez temperačního kanálu

$$Re = \frac{c^* \cdot \frac{d_h}{2}}{\nu} = \frac{1 \cdot 8,2 \cdot 10^{-3}}{0,475 \cdot 10^{-6}} = 17263$$

- oválný průřez temperačního kanálu

$$Re = \frac{c^* \cdot d_h}{\nu} = \frac{6,6 \cdot 4,2 \cdot 10^{-3}}{0,475 \cdot 10^{-6}} = 58358$$

### Výpočet součinitele přestupu tepla mezi stěnou kanálu a teplotním médiem:

- půlkruhový průřez temperačního kanálu

$$\alpha_k = 0,023 \cdot (Re^{0,8} - 230) \cdot (1,8 \cdot Pr^{0,3} - 0,8) \cdot \frac{\lambda_{tm}}{d_h / 2}$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot (17263^{0,8} - 230) \cdot (1,8 \cdot 2,98^{0,3} - 0,8) \cdot \frac{0,655}{8,2 \cdot 10^{-3}} = 6933 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

- oválný průřez temperačního kanálu

$$\alpha_k = 0,023 \cdot (Re^{0,8} - 230) \cdot (1,8 \cdot Pr^{0,3} - 0,8) \cdot \frac{\lambda_{tm}}{d_h}$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot (58358^{0,8} - 230) \cdot (1,8 \cdot 2,98^{0,3} - 0,8) \cdot \frac{0,655}{4,2 \cdot 10^{-3}} = 38178 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$





## Výpočet součinitele prostupu tepla

Při výpočtu součinitele prostupu tepla je součinitel tepelné vodivosti materiálu formy (vzhledem k teplotám tvarové vložky během experimentů) považován nezávislý na teplotě (přestože jeho hodnota se ve skutečnosti s rostoucí teplotou zvyšuje).

- standardní temperační systém s tvarovou vložkou z oceli 16MnCr5

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_k} + \frac{h}{\lambda_f} = \frac{1}{6933} + \frac{9,5 \cdot 10^{-3}}{45} \Rightarrow k = 2814 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

- standardní temperační systém s tvarovou vložkou ze slitiny Moldmax HH

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_k} + \frac{h}{\lambda_f} = \frac{1}{6933} + \frac{9,5 \cdot 10^{-3}}{110} \Rightarrow k = 4336 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

- standardní temperační systém s tvarovou vložkou ze slitiny Ampcoloy 940

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_k} + \frac{h}{\lambda_f} = \frac{1}{6933} + \frac{9,5 \cdot 10^{-3}}{208} \Rightarrow k = 5266 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

- konformní chlazení s tvarovou vložkou z oceli X5CrNiCuNb16-4

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_k} + \frac{h}{\lambda_f} = \frac{1}{38178} + \frac{3 \cdot 10^{-3}}{14} \Rightarrow k = 4158 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$